

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BÍPEDO ARTICULADO.

DRAGO DUSSICH MUÑOZ

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
INGENIERÍA MECATRÓNICA
SANTIAGO DE CALI
2003

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BÍPEDO ARTICULADO.

DRAGO DUSSICH MUÑOZ

Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Mecatrónico

Director

OSCAR IVÁN CAMPO, MME

Docente del Programa de Ingeniería Mecánica.

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DE OCCIDENTE

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

INGENIERÍA MECATRÓNICA

SANTIAGO DE CALI

2003

Nota de aceptación:

Trabajo Aprobado por el Comité de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Corporación Universitaria Autónoma de Occidente para optar al título de Ingeniero Mecatrónico.

FREDY NARANJO PÉREZ

Jurado

ANDRÉS FELIPE NAVAS

Jurado

Santiago de Cali, 25 de Julio del 2003

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto no hubiera sido posible sin la colaboración de muchas personas; la primera es mi padre, Drago Dussich, quien desde el principio me brindó sus sabios consejos, fruto de años de experiencia en ingeniería mecánica, y su ayuda incondicional para abordar este problema tan complejo. La segunda es el tutor de mi tesis, Oscar Iván Campo, quien me colaboró con sus conocimientos en las áreas del diseño mecánico y biomecánica, y sabiamente me advirtió sobre la increíble complejidad de los bípedos antropomórficos.

Debo agradecer también a las personas de Metalsur, quienes amablemente fabricaron, elementos indispensables para el robot, y que mediante un proceso diferente al corte por láser, no hubiera podido costear.

Y finalmente, a los profesores que de alguna manera se vincularon con mi formación universitaria, de cada uno de ellos hay algo en este robot, gracias por creer en este proyecto.

CONTENIDO

	<i>pág</i>
RESUMEN	13
¿Por qué Aquiles?	14
INTRODUCCIÓN	16
Metas de la Tesis	17
1. CARACTERÍSTICAS HUMANAS	18
1.1. LA FORMA HUMANA	18
1.2. LA MARCHA HUMANA	19
1.2.1. El Ciclo de Marcha	22
2. RAMAS DE LA ROBÓTICA	24
3. DISEÑO MECATRÓNICO	26
3.1. PLANEACIÓN DEL PROYECTO	27
3.1.1. Planteamiento de la misión.	27
3.1.2. Identificación de las necesidades.	27
3.1.3. Especificaciones técnicas	29
3.2. GENERACIÓN DE CONCEPTOS.	31

	<i>pág</i>
3.2.1. Descomposición Funcional.	32
3.3. GENERACIÓN DE CONCEPTOS PARA LAS SUBFUNCIONES	33
3.4. COMBINACIÓN DE CONCEPTOS.	36
3.5. SELECCIÓN DEL CONCEPTO FINAL.	38
3.5.1. Matriz de Selección	38
3.5.2. Matriz de Tamizaje.	39
3.5.3. Especificaciones Finales.	39
3.6. DESARROLLO DE LA ARQUITECTURA DEL PRODUCTO	40
3.6.1. Análisis de la Arquitectura del Producto.	40
3.6.2. Interacciones entre elementos físicos y funcionales.	41
3.6.3. Esquema del producto.	42
3.6.4. Distribución geométrica.	43
3.6.5. Identificación de interacciones fundamentales e incidentales	44
3.6.6. Arquitectura en diferentes niveles	45
3.6.7. Arquitectura del sistema mecánico.	45
3.7. DISEÑO INDUSTRIAL.	45
3.7.1. Valoración del diseño industrial	45

	<i>pág</i>
3.7.1.1. Ergonómicas	43
3.7.1.2. Estéticas	46
3.7.2. Impacto del Diseño Industrial	46
3.7.2.1. Interfaces de usuario	46
3.7.2.2. Requerimientos emocionales	47
3.7.2.3. Facilidades de mantenimiento y reparación	47
3.7.2.4. Uso apropiado de los recursos.	47
3.7.2.5. Diferenciación del producto	47
3.8. DISEÑO PARA MANUFACTURA Y ENSAMBLE	48
3.8.1. Análisis DPM (Diseño Para Manufactura)	48
3.8.1.1. Lista de componentes (Preliminar)	49
3.8.1.2. Impacto del diseño para manufactura sobre otros factores	50
3.8.2. Análisis del DPE (Diseño Para Ensamble)	50
3.8.2.1. Reducción del costo de ensamble	50
3.8.2.2. Maximización de la facilidad de ensamble	51
3.8.2.3. Reglas del DPE	51
3.8.3. Reducción del costo de aseguramiento de la calidad	51

	<i>pág</i>
3.9. PROTOTIPADO	52
3.9.1. Prototipos iniciales y sus funciones.	52
3.9.2. Prototipo a presentar.	53
4. DISEÑO MECÁNICO DEL ROBOT	55
4.1. ARQUITECTURA GENERAL DEL ROBOT	55
4.2. DISEÑO MECÁNICO DEL BÍPEDO	55
4.2.1. Cálculo del Momento de Inercia (I)	59
4.2.2. Cálculo de Fuerzas	60
4.2.3. Factor de Seguridad y Deflexión Máxima	67
4.2.4. Torsión	67
4.2.5. Conclusión de la selección del perfil.	68
4.2.6. Apoyos	69
4.2.7. Diseño de la pierna	69
4.2.8. Transmisión de potencia a las piernas	73
4.2.9. Diseño Mecánico del Cigüeñal.	74
4.2.10. Elementos del cigüeñal.	75
4.2.11. Las Bielas.	75

	<i>pág</i>
4.2.12. Procedimiento Alternativo de Diseño para la Biela	80
4.2.13. Diseño de los ejes	86
4.2.14. Selección de los rodamientos.	87
4.3. ACERCA DE LA ESTRUCTURA.	88
4.4. ACTUADORES.	89
4.4.1. Motor principal	89
5. ELECTRÓNICA Y SISTEMAS DE CONTROL.	93
5.1. SENSORES	93
5.2. LÓGICA DE CONTROL.	94
6. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE VISIÓN ARTIFICIAL.	98
6.1. CAPTURA DE IMÁGENES DESDE MATLAB.	98
6.2. DETECCIÓN DE MOVIMIENTO.	98
7. CONCLUSIONES	100
8. FUTURAS MEJORAS	101
BIBLIOGRAFÍA	102

LISTA DE CUADROS

	<i>pág</i>
Cuadro 1. Planteamiento de la Misión.	27
Cuadro 2. Listado de necesidades.	28
Cuadro 3. Especificaciones preliminares	29
Cuadro 4. Matriz de selección	38
Cuadro 6. Especificaciones finales.	40
Cuadro 7. Valoración del diseño industrial.	48
Cuadro 8. Lista de componentes (Preliminar)	49

LISTA DE FIGURAS

	<i>pág</i>
Figura 1. Modelo antropométrico en dependencia de la altura	19
Figura 2. Longitud adimensional frente a velocidad adimensional	20
Figura 3. Fuerzas actuantes sobre un péndulo invertido	21
Figura 4. El ciclo de Marcha	23
Figura 5. Representación de caja negra	31
Figura 6. Representación de subfunciones	31
Figura 7. Rama crítica	32
Figura 8. Robot Shadow	34
Figura 9. Robot Mike	34
Figura 10. Robot Baps	34
Figura 11. Mecanismo cíclico	34
Figura 12. Robot Bart	35
Figura 13. WL-10RV1	35
Figura 14. Robot Mike	35
Figura 15. Robot M2	35
Figura 16. Esquema del producto.	42
Figura 17. Distribución geométrica.	43
Figura 18. Interacciones incidentales.	44
Figura 19. Tendencia del diseño.	46
Figura 20. Imagen del prototipo	53
Figura 21. Clasificación de los prototipos	54
Figura 22. Imagen de la pierna	56
Figura 23. Imagen del pie	56
Figura 24. Diagrama de cargas	56
Figura 25. Diagrama de cortante	57
Figura 26. Diagrama de momentos	57
Figura 27. Gráfica del perfil	58
Figura 28. Esfuerzo cíclico fluctuante.	60
Figura 29. Curva S-N para el aluminio (Semilogaritmica)	66
Figura 30. Cigüeñal	74
Figura 31. Elementos del cigüeñal.	75
Figura 32. Curva S-N para el aluminio a flexión y carga axial.	79
Figura 33. Procesamiento de la imagen.	100

LISTA DE ANEXOS

	<i>pág</i>
Anexo A. Plano del soporte simple	106
Anexo B. Plano del soporte doble	107
Anexo C. Plano de la biela	108
Anexo D. Plano de ejes	109
Anexo E. Plano del cigüeñal	110
Anexo F. Vista en explosión del cigüeñal	111
Anexo G. Plano de la polea	112
Anexo H. Vista del mecanismo cíclico	113
Anexo I. Plano del pie	114
Anexo J. Vista en explosión del pie	115
Anexo K. Plano de la pierna	116
Anexo L. Vista en explosión de la pierna	117
Anexo M. Plano del ensamble	118
Anexo N. Esquemático de la Tarjeta Sisdei 51	119
Anexo Ñ. Esquemático del circuito de potencia.	120
Anexo O. Análisis de elementos finitos de la biela	121
Anexo P. Diagrama de flujo de los algoritmos de control	130

RESUMEN

Esta tesis presenta el proceso de diseño del robot bípedo Aquiles. La motivación primaria para este trabajo consistía en enfrentar el desafío que representa el diseño de un robot de estas características, la meta no fue lograr un diseño de gran complejidad tanto a nivel mecánico como de inteligencia computacional, sino por el contrario, crear una plataforma de increíble simplicidad y de muy bajo costo que permitiera, el inicio de un proceso de desarrollo de una nueva clase de robots móviles en nuestro medio.

Con esto en mente, el proyecto se estructuró desde el comienzo como un sistema principalmente mecánico, que logra los movimientos básicos de un ciclo de marcha, con la utilización de un sólo actuador, lo cual reduce enormemente los costos y la complejidad sistemática del robot.

A continuación un resumen por capítulos:

Introducción: Presenta la importancia del proyecto, y explica el porque su intención de tomar algunos modelos de la biología para este desarrollo, y las metas que se pretenden alcanzar.

Capítulo 1: Describe el proceso de la marcha humana desde el punto de vista de la ingeniería, sobre el tema existe una enorme cantidad de documentación, así que este es buen punto de partida para iniciar el proceso de diseño del robot.

Capítulo 2: Aquí se muestran otros robots existentes en la actualidad, resultado de investigaciones de científicos e ingenieros de diferentes lugares del mundo, también se exploran las diferencias que existen entre este campo de investigación, y el de la robótica de manipuladores.

Capítulo 3: Presenta el proceso de diseño del robot, siguiendo la metodología estudiada en los cursos de Diseño Mecatrónico.

Capítulo 4: Presenta una descripción del sistema mecánico, modelamiento matemático de los elementos que lo componen, y su análisis de esfuerzos por fatiga.

Capítulo 5: Detalles de la electrónica, los sensores, y la lógica de control que hace posible el funcionamiento del robot.

Capítulo 6: Descripción del sistema de visión artificial, se explica aquí el uso de la técnica Tracking para detección de movimiento, y el algoritmo que se utilizó para su implementación.

Capítulo 7: Conclusiones y consejos para futuros desarrollos.

¿Por qué Aquiles?

La relación de este robot con el mítico guerrero de la Ilíada no es directa, no toma su nombre debido a que lo caractericen su particular fuerza o agilidad, su nombre realmente se deriva de la paradoja propuesta por Zenón de Elea que nos habla de la imposibilidad del movimiento.

Lo que propone el filósofo en este sofisma es el hecho que Aquiles no puede nunca alcanzar una tortuga, ya que primero debería llegar al punto en que ella estaba cuando él empezó a correr, luego al punto al que, mientras él proseguía su carrera, hubiese llegado ya la tortuga, y así sucesivamente hasta el infinito.

El sentido común nos muestra de inmediato lo errado de este planteamiento, sin embargo, es útil para explicar la idea básica del desplazamiento de este robot, éste es una estructura que es estáticamente estable en cualquiera de sus posiciones, y las componentes inerciales resultantes de estos cambios de posición no son suficientes para llevar al robot a la inestabilidad, debido a que su estabilidad es inherente al sistema mecánico.

INTRODUCCIÓN

En tiempos recientes, se ha reconocido el hecho que la naturaleza es no solo la fuente de los recursos que necesitamos, sino también una valiosa fuente de información y de soluciones a los problemas de ingeniería, por ejemplo, las nuevas tendencias dentro del campo de lo que se ha denominado inteligencia artificial son técnicas bioinspiradas, tales como: las redes neuronales artificiales, la lógica difusa y la computación evolutiva; que actualmente se aplican con gran éxito en la academia y la industria.

Pero las soluciones bioinspiradas no son sólo aplicables al interior de las computadoras digitales. En la actualidad, sistemas de manufactura en todo el mundo utilizan manipuladores mecánicos, denominados brazos antropomórficos, precisamente dado su parecido con un brazo humano.

Otros grandes diseños naturales que tendrían importantes aplicaciones son, por ejemplo, una mano humana con sus 22 grados de libertad, cuya implementación es un verdadero desafío, requiere integrar lo mejor de diversas tecnologías y áreas de la ingeniería, como la mecánica, la electrónica y la informática; o en el caso de la robótica móvil la construcción de un robot bípedo, que pueda enfrentar los ambientes que hemos diseñado para nosotros mismos, terrenos difíciles, y tenga una eficiencia energética mayor que la de sus contrapartes con ruedas. La solución a estos problemas podría ser la construcción de un robot bípedo antropomorfo, pero dada su naturaleza inestable, requiere sistemas de compensación adicionales, cuyo control resulta muy complejo. En diferentes ocasiones se han construido bípedos con estas características, en la mayoría de los cuales se recurre a un andar muy lento, que provee de condiciones casi estáticas, lo que facilita enormemente su control, y en otras se enfrenta el problema con unos costos muy elevados. Pero este diseño tiene otra desventaja,

la poca capacidad de carga que ofrece, por lo general, no ofrecen siquiera autonomía energética.

En el presente proyecto se abordarán estos problemas con un diseño un tanto diferente del antropomórfico, pero que ofrece la mayoría de las ventajas de un bípedo, pero con una mayor capacidad de carga, y una mayor estabilidad.

Metas de la Tesis.

La meta principal de la tesis es la construcción de un robot bípedo que no requiera de ningún tipo de control electrónico para lograr su estabilidad, aunque inicialmente se pensó en un robot antropomórfico, una investigación de bibliografía existente sobre el tema y tesis que se centraban en este tema (la mayoría a nivel de maestría) mostraban un nivel de complejidad, y un costo muy elevado para realizarse en el tiempo y con el presupuesto disponibles.

Existen numerosos antecedentes que describen robots similares, los cuales son citados más adelante, estos proyectos han sido desarrollados en su mayoría a nivel académico, principalmente como tesis para optar un título de maestría en ciencias, aquí se muestran algunos de ellos, y se documenta a manera de búsquedas externas, ideas muy originales y funcionales para enfrentar lo que se constituye en uno de los campos de investigación más desafiantes de la actualidad.

El diseño por el que se optó finalmente esta seriamente restringido en lo que a la naturaleza de los ambientes en los que puede desplazarse se refiere, es decir, a diferencia de un bípedo de características antropomórficas, por ejemplo, no puede subir escaleras, pero no sólo tiene desventajas, aparte de su relativamente bajo costo y su simplicidad al momento del diseño y la construcción, posee otras

ventajas que pueden ser importantes para que en un futuro este tipo de robots tengan un éxito comercial, quizá el más importante es su capacidad de transportar carga, debido a que su estabilidad es inherente al sistema mecánico.

Otra de las metas del proyecto es probar un diseño nuevo que permite lograr el ciclo de marcha con un sólo actuador, al menos para lograr desplazamiento en el plano sagital, y hallar mediante el uso de técnicas iteradas de diseño mecánico una combinación optima de elementos de máquina que minimizaran la función peso.

Adicionalmente, se espera que el robot se convierta en una plataforma para la realización de futuras investigaciones en el campo de la robótica móvil, y sirva como motivación para la construcción futura de otros robots que podrían aproximarse más a la meta de la creación de robots industriales y de servicio, que puedan ayudar a las personas que lo requieran, o remplazarlas en tareas peligrosas.

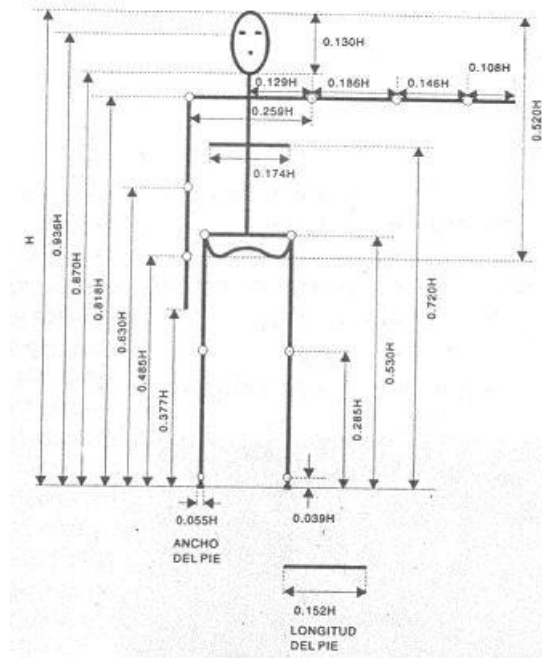
1. CARACTERÍSTICAS HUMANAS.

En este capítulo se explica de una forma rápida algunos conceptos básicos de antropometría y biomecánica, los cuales sirven para entender lo que se desea lograr con este proyecto y alguna terminología que facilita explicaciones subsecuentes.

1.1. LA FORMA HUMANA.

Existe en la actualidad un enorme cumulo de conocimientos acerca de las características del cuerpo humano, debido a los trabajos realizados en una de las ramas de la antropología, la antropometría, que inicialmente se utilizó como técnica para estudiar aspectos relacionados con la evolución, pero que en la actualidad se ha vinculado fuertemente con la ingeniería debido al creciente número de relaciones hombre-máquina, ya que ahora se constituye en una poderosa herramienta de diseño.

Figura 1. Modelo antropométrico en dependencia de la altura. (Drillis y Contini, 1966).



Existen numerosas tablas que permiten determinar cualquier característica de interés, dependiendo del individuo, así por ejemplo es posible conocer mediante estas la velocidad del desplazamiento de un individuo de determinado sexo, edad y estatura.

Esta documentación fue utilizada durante el proceso de diseño para determinar algunas características deseables para el robot, aunque este no posea características antropomórficas.

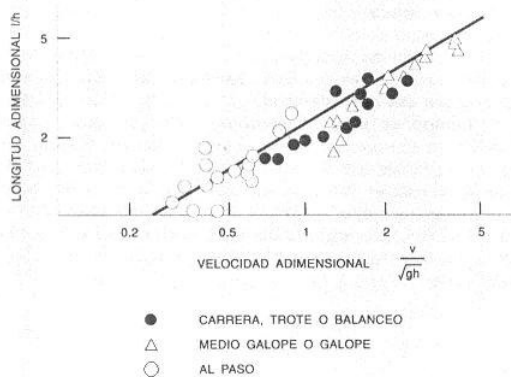
1.2. LA MARCHA HUMANA.

La marcha humana es un proceso de locomoción en el cual el cuerpo humano, en posición erguida se mueve hacia adelante, siendo su peso soportado

alternativamente por ambas piernas, para lograr una adecuada descripción de este proceso no sólo es necesario conocer los movimientos cíclicos que son realizados, sino también otros elementos involucrados, tales como: fuerzas de reacción entre los pies y el suelo, fuerzas y momentos articulares, requerimientos energéticos y mecanismos de optimización, y la intensidad de la contracción de los diferentes músculos involucrados.

En 1983, el científico británico R. Alexander, publicó su obra *Animal Mechanics*, en la que analizó las características básicas de locomoción de diferentes animales, y realizó mediciones sobre distancias y tiempos de los movimientos propios de cada especie buscando una ley general que los agrupara a todos. Así propuso una comparación entre dos resultados adimensionales: el primero, calculado como el cociente entre la longitud total de un ciclo (2 pasos) y la altura de la cadera, y el segundo, obtenido como el cociente de la velocidad de desplazamiento y la raíz cuadrada del producto de la altura de la cadera por la gravedad; en esta comparación aparece una clara relación lineal.

Figura 2. Longitud adimensional frente a velocidad adimensional, en escala logarítmica.



Este resultado constituye una velocidad adimensional conocida como número de

Froude, que relaciona las fuerzas inerciales con las gravitatorias.

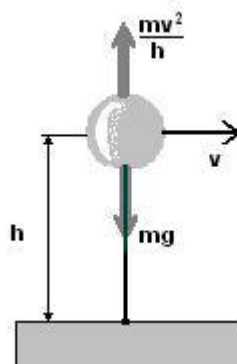
Un proceso de modelación asemeja una pierna a un péndulo invertido que gira sobre su punto de contacto con el suelo, el número de Froude en este caso puede calcularse así:

$$F_i = m \cdot a_i \quad F_g = m \cdot g$$

$$\frac{F_i}{F_g} = \frac{v^2}{g \cdot h} = Froude^2$$

Aquí es posible ver que si el número de Froude es igual a la unidad, las fuerzas inerciales superan a las gravitatorias y el péndulo se separa del suelo. En su trabajo Alexander describe el momento exacto en que diferentes especies pasan de la marcha al trote o al galope, cuando en el ciclo comienzan a aparecer fases aéreas.

Figura 3. Fuerzas actuantes sobre un péndulo invertido.



m = masa del cuerpo
v = velocidad del desplazamiento
g = gravedad
h = altura de la cadera

1.2.1. El ciclo de Marcha

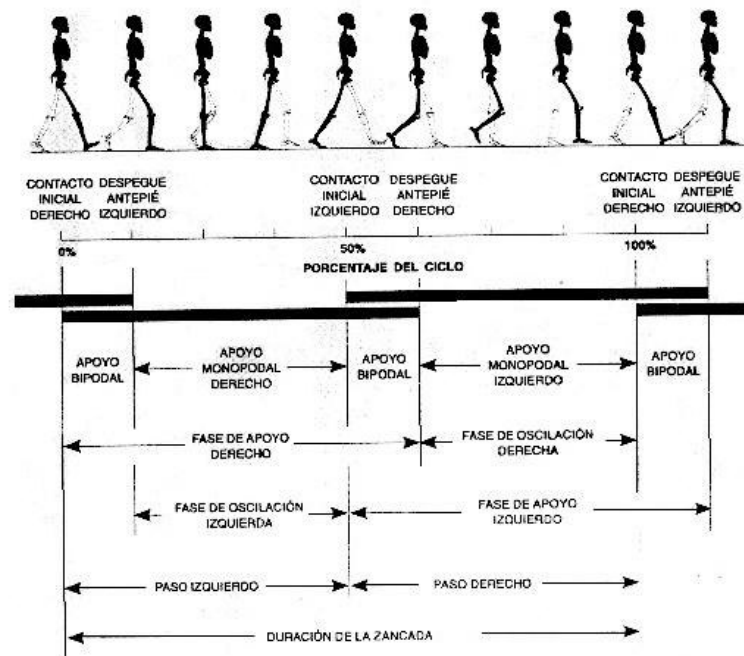
El ciclo de marcha puede definirse como la secuencia de acontecimientos que tienen lugar entre dos repeticiones consecutivas de uno cualquiera de los sucesos de la marcha. Por convención se toma como origen el contacto del pie derecho con el suelo, y termina con el siguiente apoyo del mismo pie.

Durante un ciclo de marcha completo, cada pierna pasa por una serie de fases:

- **Fase de apoyo:** En donde el pie se encuentra en contacto con el suelo.
- **Fase de oscilación:** El pie se encuentra en el aire mientras avanza.

La fase de apoyo representa el 40% del tiempo del ciclo de marcha, y la fase de oscilación el 60% restante, en la otra pierna ocurre lo mismo 50% del ciclo fuera de fase, esto muestra la existencia de un 10% del tiempo del ciclo en el que los pies están simultáneamente apoyados. La duración relativa de estas fases depende de la velocidad, tendiendo a aumentar la fase de oscilación respecto a la del apoyo, los períodos de doble apoyo tienden a desaparecer entre la marcha y la carrera.

Figura 4. El ciclo de Marcha.



La distancia medida entre dos apoyos consecutivos se denomina longitud de la zancada, mientras que la distancia que separa los puntos de apoyo de un pie y otro es llamada longitud del paso. De manera análoga se denominan tiempo de zancada, y tiempo del paso a los intervalos entre dichos eventos.

Al número de pasos ejecutados en una unidad de tiempo, por ejemplo, un minuto se le conoce como cadencia, y la velocidad de la marcha es la distancia recorrida por el cuerpo en la unidad de tiempo.

2. RAMAS DE LA ROBÓTICA.

En este capítulo se realiza una comparación entre los logros alcanzados por la robótica de manipuladores y la de robots móviles que funcionan con el uso de piernas.

En 1954 George Devol desarrolló el primer brazo robótico programable, en 1975 Victor Scheinman, un estudiante de Stanford, diseñó el primer manipulador realmente flexible conocido como PUMA, el cual inicio una verdadera revolución, ya que con sus 6 grados de libertad podía colocar un objeto en cualquier posición y orientación dentro de su espacio de trabajo, esta fue la base para los 700.000 robots que funcionan actualmente en el mundo industrializado que se dedican permanentemente a la realización de todo tipo de actividades dentro de las más diversas industrias.

Acerca de la rama de la robótica que explora la locomoción análoga a la animal, es bastante menos lo que se puede decir, ya que a pesar del sinnúmero de grupos de investigación que trabajan actualmente en el problema, y a los elevados presupuestos a los que tienen acceso no existe en la actualidad un robot de estas características que se desempeñe en la industria, o que este disponible en el comercio, algunos de los trabajos más notables en esta rama son citados en el aparte de selección de conceptos del capítulo 3. A continuación algunas diferencias entre estas ramas:

- **Actuadores:** Para facilitar el diseño de un brazo manipulador es posible pensar en una transferencia de los movimientos desde los actuadores situados en un lugar donde no representen carga alguna para el robot hasta el punto donde el movimiento debe producirse a través de mecanismos sencillos como correas, cadenas o incluso tendones, un robot móvil siempre debe transportar el peso

de sus propios actuadores.

- **Punto de referencia:** En la robótica de manipuladores, generalmente, existe un punto del espacio al cual el robot se encuentra anclado, y el cual puede tomarse como referencia para realizar todas las estimaciones necesarias para el funcionamiento del robot, en la robótica móvil, sin embargo, este punto de referencia a partir del cual se pueden calcular la posición de las extremidades está en constante movimiento, a la par del robot.
- **Perturbaciones:** Dado que un robot manipulador tiene un espacio de trabajo limitado, el número de perturbaciones al que podría estar expuesto está bastante restringido, es decir, se reducen las posibilidades de cambios no previstos en el entorno, como la inclinación del suelo, o la aparición de obstáculos; para un robot móvil no existen estas garantías, ya que su espacio de trabajo no está restringido, debe ser capaz de enfrentar ambientes con condiciones cambiantes.
- **Mediciones:** Para que un robot manipulador se considere exitoso, debe ser capaz de conocer en todo momento la posición y orientación de cada uno de sus componentes en el espacio, esto se realiza mediante mediciones muy precisas en cada una de sus juntas que permiten calcular esta información, sin embargo para un robot móvil, tal precisión no es requerida, su éxito depende más de capacidad de moverse que de la precisión misma con la que realice estos movimientos.
- **Impactos:** Un brazo manipulador adecuadamente programado posiblemente nunca esté expuesto a un impacto, un robot móvil debe soportar constantes impactos los cuales son la reacción del suelo a su propio andar, es decir, cada paso es un impacto.

3. DISEÑO MECATRÓNICO

En este capítulo se refleja no sólo el proceso de diseño de un robot móvil, muestra también la forma en que los temas de los cursos de diseño mecatrónico son aplicados en la práctica para facilitar el proceso de diseño, mejorar las características finales del producto, disminuir los costos de producción, y minimizar los daños al ambiente; a través de una metodología estructurada y clara es posible explorar todas las posibles soluciones a un problema abierto de ingeniería, elegir la mejor o combinar varias para hallar un compromiso entre todos los aspectos implicados, refiriéndose no solo a los de ingeniería, sino también a los sociales, los ambientales, los económicos e incluso los emocionales.

Como se mencionó anteriormente la meta es la creación de un robot bípedo que pueda desplazarse de forma autónoma, aquí los conceptos y procesos de prototipado fueron puestos a prueba de forma rigurosa, no sólo por la dificultad implícita en la construcción de este tipo de robots, sino también por las limitaciones de tiempo y costo presentes para el desarrollo del proyecto.

A lo largo del proceso de diseño y del desarrollo del prototipo, se tuvo siempre en cuenta la metodología de diseño mecatrónico propuesta en los cursos [Ulrich y otros, 2000] para lograr la satisfacción de las necesidades, reduciendo los recursos necesarios para el desarrollo.

3.1. PLANEACIÓN DEL PROYECTO.

3.1.1. Planteamiento de la misión.

A continuación se da una descripción muy breve del producto, de los requerimientos, y de la mercadotecnia que este encierra.

Cuadro 1. Planteamiento de la Misión.

Descripción del producto	Dispositivo bípedo con capacidad de desplazarse autónomamente.
Metas claves del negocio	Autónomo. Robustez y fiabilidad. Bajo costo. Carga útil. Posibilidad de mejoras futuras. Culminación en Julio del 2003.
Mercado Primario.	Universidad Autónoma de Occidente.
Mercado Secundario.	Cursos de robótica móvil.
Restricciones y supuestos.	Estabilidad inherente. Costo. Tiempo de desarrollo. Autonomía energética.

3.1.2. Identificación de las necesidades.

Las necesidades y su nivel de importancia (imp) se interpretaron a partir de la consulta de publicaciones que describen trabajos similares, textos referentes al campo de la biomecánica, entrevistas a profesores del área de mecánica de la universidad, y a un análisis realizado por el grupo de desarrollo.

Cuadro 2. Listado de necesidades.

#	NECESIDADES		IMP
1	El dispositivo	Debe ser autónomo	4
2	El dispositivo	Debe tener gran robustez.	5
3	El dispositivo	Debe trabajar sin cables externos.	4
4	El dispositivo	Debe tener resistencia a condiciones adversas	4
5	El dispositivo	Debe tener un costo accesible	5
6	El dispositivo	Debe requerir poco mantenimiento	5
7	El dispositivo	Debe ser liviano.	5
8	El dispositivo	Debe ser fácil de transportar.	3
9	El dispositivo	Debe ser rápido.	2

3.1.3. Especificaciones técnicas. (Preliminares)

Para determinar estos valores se realizaron entrevistas con personas vinculadas a la universidad que brindaron una opinión sobre que características serían deseables para el producto final, esta información influye a lo largo de todo el proceso de diseño, adicionalmente sirve como referencia para comparar el dispositivo con otros existentes, aunque algunos de ellos, no posean las mismas características que resultaron deseables para este desarrollo, tal es el caso de la autonomía energética.

Cuadro 3. Especificaciones preliminares.

#	#NC	MÉTRICAS	IMP.	UNID.	VALOR
1	1,3	Autonomía energética	4	horas	3
2	1,3	Autonomía lógica	4	binario	1
3	5	Costo	5	\$	2'500.000
4	9	Velocidad	2	m/min	4,2
5	2,4,6	Vida útil	4	años	10
6	1,2,3,8	Adaptabilidad	4	Subj.	4
7	4,6	Tiempo entre averías	5	meses	3
8	5,7,8	Peso	5	kg	3
9	1,2,9	Masa a transportar	5	kg	4

Las especificaciones se derivan de un análisis realizado partiendo de las necesidades, y una buena robustez en el diseño; los valores seleccionados para la vida útil, y el tiempo medio entre averías se escogieron a partir de los estudios realizados acerca de la fatiga en elementos mecánicos durante el curso de diseño mecánico, y de conocimientos previos acerca del comportamiento de los motores de corriente continua, los cuales son los más fuertes candidatos para el proyecto.

3.2. GENERACIÓN DE CONCEPTOS.

En esta fase se ha descompuesto el problema en funciones para facilitar la visualización y comprensión, de esta manera se identificó la rama crítica para a partir de allí generar conceptos a través de búsquedas internas y externas como: búsquedas en la red de publicaciones relacionadas con el tema, investigación de bibliografía del campo de la biomecánica, e ideas propias.

3.2.1. Descomposición Funcional.

En este primer diagrama se enfrenta al problema como una caja negra de la cual lo único que se conoce son algunas entradas y salidas. Esto facilita la comprensión del problema en toda su dimensión y conduce a la siguiente etapa que consiste en realizar una descomposición funcional del problema.

En esta descomposición se ve esa caja negra desde otro punto de vista pues se analiza que funciones debe cumplir el robot para realizar a cabalidad la tarea para la que fue diseñada, sin especificar realmente como se va a implementar ninguna de dichas funciones, ya que esto limitaría el proceso de diseño a una solución particular que puede o no ser la más adecuada.

Así pues, se realizó una descomposición de las tareas que se deben ejecutar desde las entradas del sistema y ver como deben relacionarse para llegar al mismo fin lo cual se plasmó en el siguiente diagrama.

Este es el punto de partida para generar conceptos de tal forma que cada subfunción sea solucionada de la mejor manera.

Figura 5. Representación de caja negra.

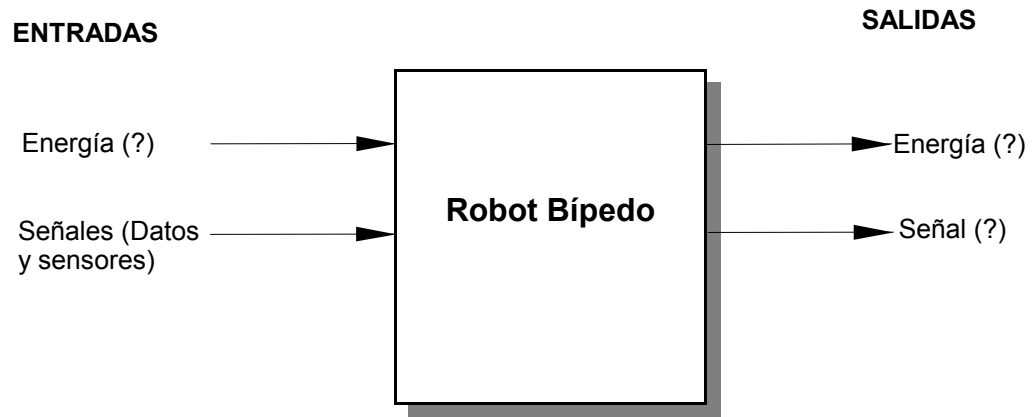
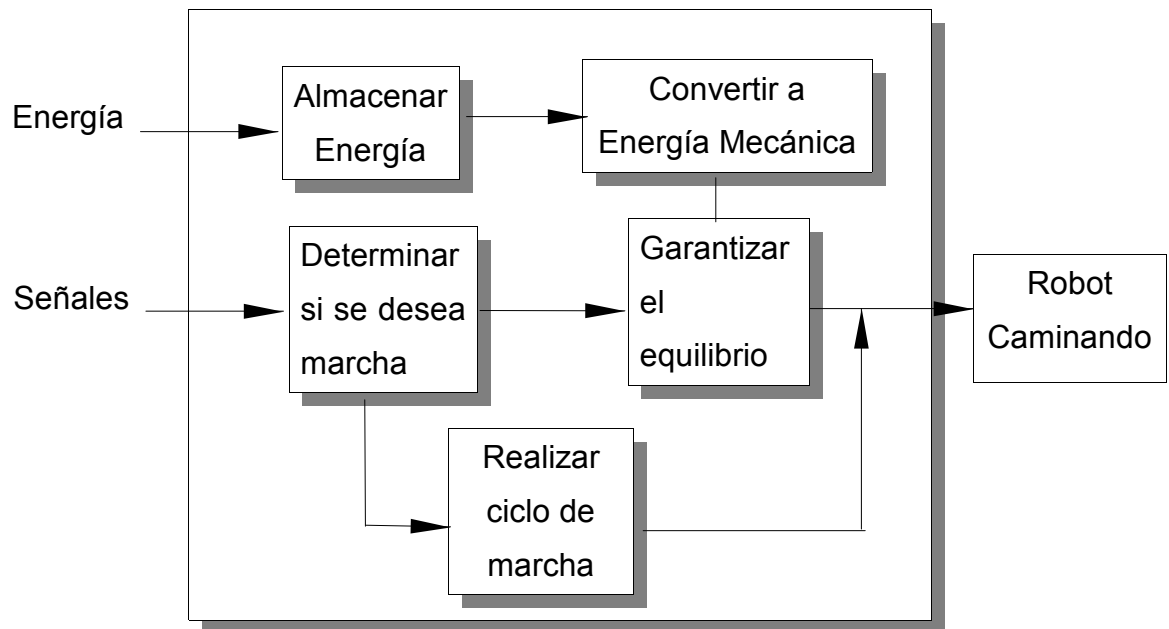
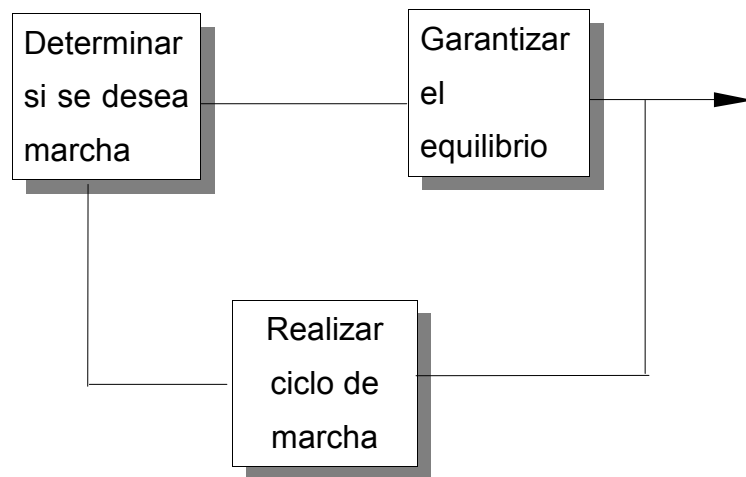


Figura 6. Representación de subfunciones



Rama Crítica: Es evidente que el principal objetivo del proyecto es la construcción de un robot que sea capaz de sostenerse, es decir, garantizar su propio equilibrio mientras se desplaza, por tanto se ha elegido esta subfunción como la rama crítica.

Figura 7. Rama crítica



3.3. GENERACIÓN DE CONCEPTOS PARA LAS SUBFUNCIONES

La investigación inicial se centró en conceptos propios de la biomecánica de la marcha de criaturas bípedas, mientras que lo referente a conceptos aplicados para dar solución a los problemas más importantes relacionados con este tipo de robots, como lograr la estabilidad, o el desplazamiento, fue pospuesta para evitar influencias en la generación de conceptos, sin embargo, posteriormente se realizó dicha investigación para continuar con el proceso de diseño, la mayoría de los conceptos que se generaron ya habían sido aplicados, en ocasiones de manera exitosa, por ello se decidió que los conceptos fueran ilustrados por los robots que los representan, para el concepto del mecanismo cíclico no se encontraron propuestas similares, y por ello se eligió como el concepto propio y fue necesario representarlo mediante un bosquejo.

Se han generado conceptos para todas las funciones del diseño, aquí se muestran aquellos de la rama crítica.

Conceptos para lograr control del dispositivo.

Software implementado en un microcontrolador.

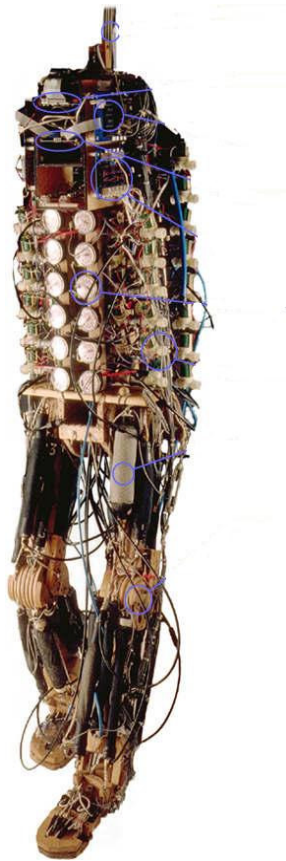
Sistema dedicado implementado en un PLD.

Conceptos para lograr el desplazamiento.

Como la meta es la construcción de un robot bípedo, los conceptos que pueden generarse deben asimilarse a manera de piernas; sin embargo, son numerosas las formas en que puede lograrse la locomoción.

Concepto #1.
Antropomórfico.

Figura 8. Robot Shadow



Concepto #2.
Internas - Externas.

Figura 9. Robot Mike

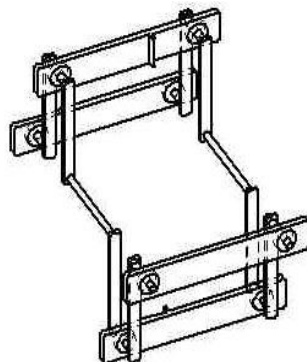


Concepto #3.
Lineales

Figura 10. Robot Baps



Concepto #4. Cíclico
Figura 11. Mecanismo Cíclico

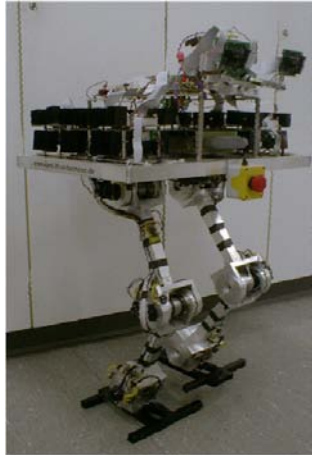


Conceptos para lograr la estabilidad.

Concepto #1

Masa móvil.

Figura 12. Robot Bart



Concepto #2

Péndulo invertido.

Figura 13. WL-10RV1



Concepto #3

Autoestabilizado.

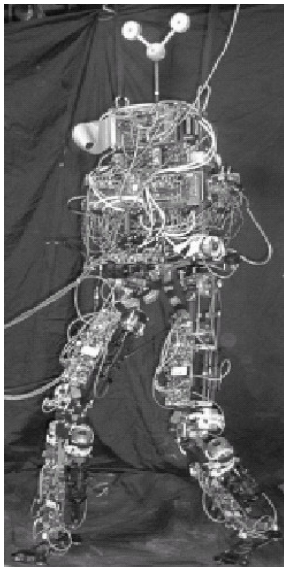
Figura 14. Robot Mike



Concepto #4

Inestable.

Figura 15. Robot M2



3.4. COMBINACIÓN DE CONCEPTOS.

En las imágenes pueden apreciarse robots existentes, en su orden son: Shadow Robot, Mike, Baps, Bart, diseño propio, WL-10RV1, mike, M2; los cuales han sido diseñados y contruidos en universidades alrededor del mundo, para su fabricación se han aplicado exitosamente los conceptos antes descritos, así evaluaremos la combinación de estos conceptos en la forma de los robots, y según la descripción de sus propios autores.

Shadow Robot: Este robot fue construido por Shadow Company, una empresa dedicada a la fabricación de actuadores neumáticos, para mostrar el potencial de estos, el robot es capaz de imitar el movimiento propio de la marcha humana, pero su sistema de balance se encuentra actualmente en desarrollo, es decir, no logra caminar de forma autónoma sino que debe ser soportado externamente.

Mike: Desarrollado por el Laboratorio de Biorrobótica Delft, este posee actuadores neumáticos, que poseen una buena relación peso-potencia, tiene un peso total de 6 kg, y logra desplazarse de manera autónoma, incluso en pendientes ligeras, actualmente esta siendo modificado para poder desplazarse en diferentes direcciones.

Baps: También es producto del trabajo desarrollado en el laboratorio de Biorrobótica Delft, este robot logra estabilidad mediante un sistema en lazo abierto que compensa para llevar el centro de masa del robot sobre sus pies, también se encuentra siendo modificado para lograr marcha en diferentes direcciones.

Bart: Desarrollado en la Universidad de Hannover es un robot humanoide que posee como mecanismo de compensación para lograr su equilibrio, posee 6 grados de libertad, ya actualmente su desplazamiento es únicamente en el plano

sagital, utiliza para su control un RTOS, o sistema operativo de tiempo real, diseñado para este propósito.

WL-10RV1: Desarrollado en la Universidad de Waseda en Japón, este robot logra su estabilidad mediante el uso de un péndulo invertido de 2 grados de libertad, y una marcha muy lenta, sólo puede desplazarse en línea recta.

M2: Diseñado como tesis de maestría en ciencias del MIT, más que ser un bípedo funcional es una plataforma para realizar investigaciones sobre la marcha humana, posee características muy similares a las humanas, tanto en dimensiones como en peso, permite la simulación de movimientos realizados por los seres humanos posee 12 grados de libertad, y no posee ningún mecanismo para lograr su equilibrio, para su desplazamiento debe recibir soporte.

P2: Es el arquetipo del robot humanoide, desarrollado por Honda, con una investigación de 10 años y con un costo de 100 millones de dólares es el primer bípedo capaz de subir escaleras, y de desplazarse sin ninguna intervención humana en cualquier dirección.

Concepto propio (Aquiles): Este diseño surge de la combinación de los conceptos cíclico y autoestabilizado, ya que debido a la utilización de un único actuador puede reducirse de manera significativa el peso, y al ser inherentemente estable debido a las dimensiones de sus pies, que permiten que la proyección del centro de masa se encuentre siempre situada sobre uno de los pies.

3.5. SELECCIÓN DEL CONCEPTO FINAL.

Debido a que en un trabajo de grado es de gran importancia la originalidad de los conceptos que se desean probar de antemano se ha seleccionado, el concepto propio como el que será llevado a cabo, sin embargo, se continuará con el proceso de selección para mostrar la importancia de las ventajas que podría introducir este diseño.

3.5.1. Matriz de Selección.

Cuadro 4. Matriz de Selección.

Criterio de Selección	Variantes de Conceptos							Ref
	<i>Shadow</i>	<i>Mike</i>	<i>Baps</i>	<i>Bart</i>	<i>WL-10RV1</i>	<i>M2</i>	<i>Aquiles</i>	<i>P2 (Honda)</i>
Autonomía	-1	1	1	1	1	-1	1	0
Costo	0	0	0	0	0	0	1	0
Velocidad	-1	1	1	0	0	0	1	0
Vida útil	1	1	1	1	1	1	1	0
Adaptabilidad	-1	0	-1	1	0	-1	-1	0
Tiempo entre averías	-1	-1	-1	1	1	1	0	0
Peso	0	0	0	0	0	0	1	0
Masa a transportar	0	0	0	0	0	0	1	0
Positivos	1	3	3	3	3	2	6	
Negativos	4	1	2	0	0	2	1	
Total	-3	2	1	3	3	0	5	
Orden	7	4	5	3	2	6	1	
Continuar	No	No	No	No	No	No	Sí	

Para la realización de esta matriz se realizaron comparaciones e cada uno de los conceptos contra el concepto de referencia para el que fue seleccionado el robot P2, de la Honda, que esta a la cabeza de los desarrollos en el área, esto desde luego guardando las proporciones entre las características alcanzadas por los otros trabajos y el que desea realizarse, con el modelo de la Honda.

3.5.2. Matriz de Tamizaje.

Debido a la considerable ventaja que ofrece el diseño que se propone sobre otros que se han construido en el pasado, no se consideró necesaria la realización de una matriz de tamizaje.

3.5.3. Especificaciones Finales.

Después de haber realizado la selección del concepto, y de haber seleccionado algunos componentes cruciales como las batería, que además de ser recargable, ofrece una buena relación peso-carga, o la utilización de la tarjeta sisdei, que permitía realizar una programación directa desde el PC, se analizó que características finales tiene este dispositivo.

Cuadro 6. Especificaciones finales.

#	#NC	MÉTRICAS	IMP.	UNID.	VALOR
1	1,3	Autonomía energética	4	horas	3
2	1,3	Autonomía lógica	4	binario	1
3	5	Costo	5	\$	2'500.000
4	9	Velocidad	2	m/min	4,2
5	2,4,6	Vida útil	4	años	10
6	1,2,3,8	Adaptabilidad	4	Subj.	4
7	4,6	Tiempo entre averías	5	meses	3
8	5,7,8	Peso	5	kg	3
9	1,2,9	Masa a transportar	5	kg	4

3.6. DESARROLLO DE LA ARQUITECTURA DEL PRODUCTO

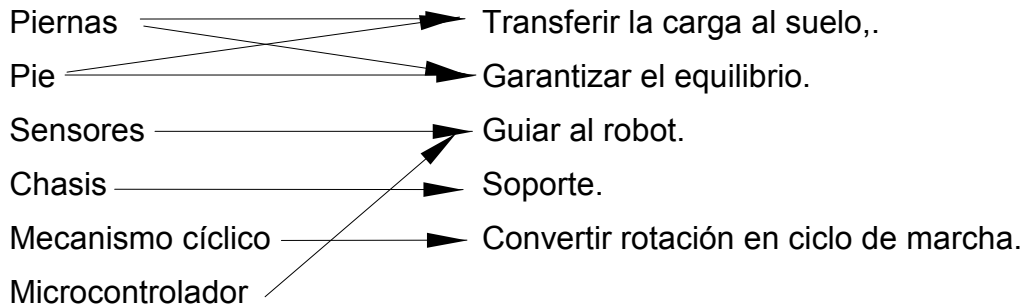
3.6.1. Análisis de la Arquitectura del Producto.

Aquí se decidirá que arquitectura será más conveniente que predomine para el éxito del diseño. La arquitectura modular ofrece algunas ventajas sobre la arquitectura integral en este caso en particular.

- El desempeño es muy importante para el robot, ya que se requiere el peso propio de la estructura sin sacrificar su capacidad de carga, lo cual se traduce en que la arquitectura más conveniente es la integral, sin embargo, por ser un desarrollo altamente experimental, una arquitectura integral dificulta el proceso de diseño, en particular debido a que durante la construcción del prototipo pueden ser necesarias modificaciones al diseño original.
- En el corto plazo podrían realizarse numerosas modificaciones y actualizaciones al robot, para lo cual resulta conveniente una arquitectura

modular.

3.6.2. Interacciones entre elementos físicos y funcionales.

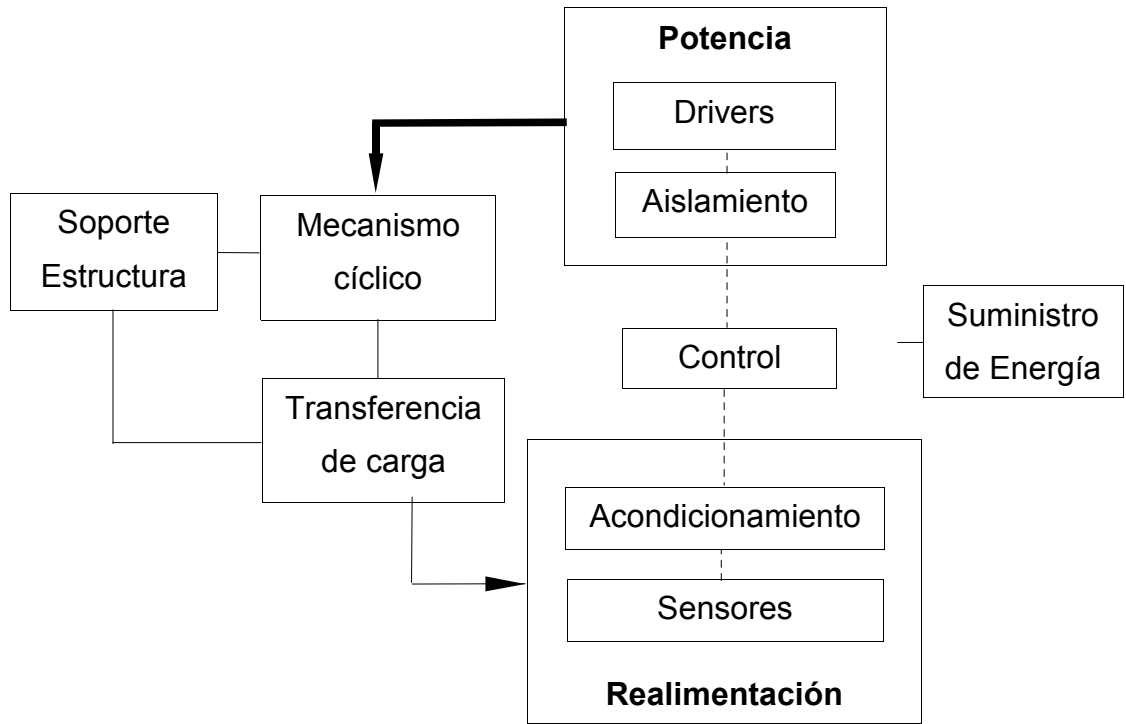


Esta relación entre elementos físicos y funcionales define una arquitectura predominantemente modular, debido a la limitada cantidad de interacciones.

Debido a la cantidad de interacciones, y a la importancia de realizar mejoras y futuras adiciones, se determinó que la arquitectura que debe predominar es la modular.

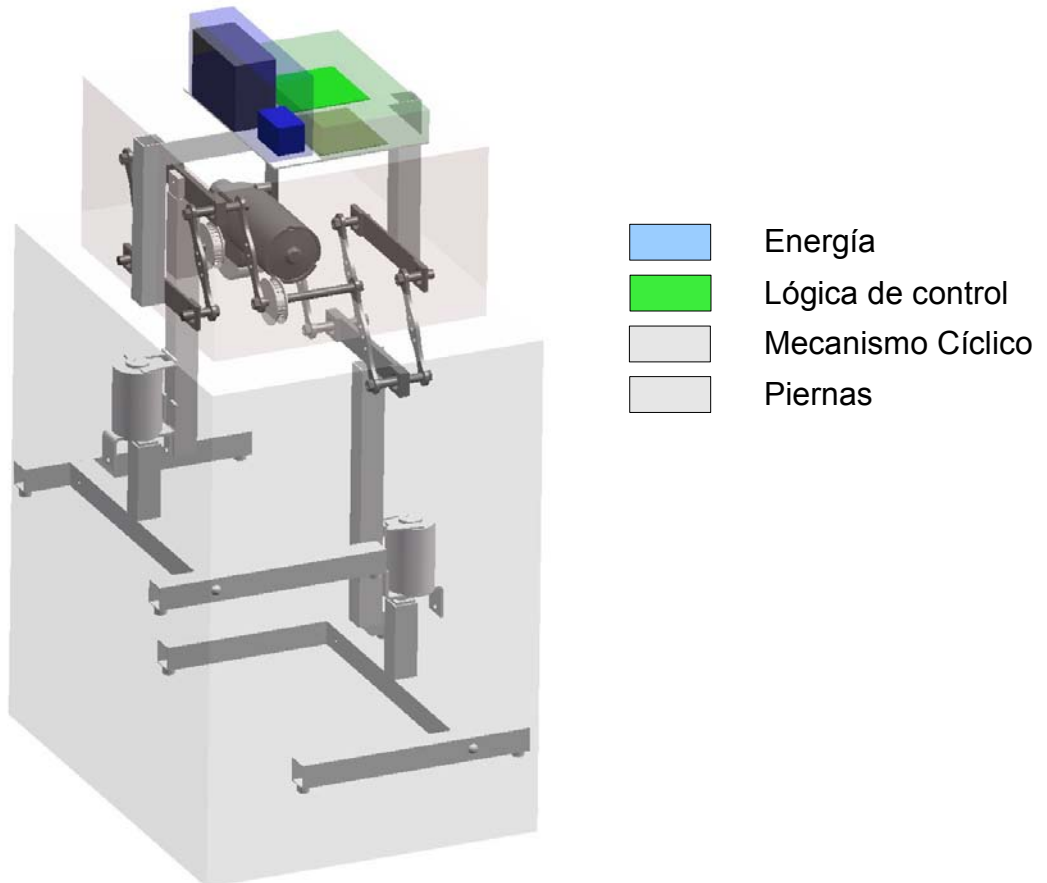
3.6.3. Esquema del producto.

Figura 16. Esquema del producto



3.6.4. Distribución geométrica.

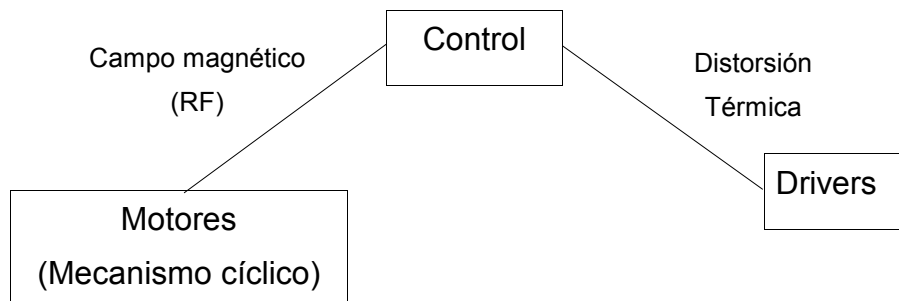
Figura 17. Distribución geométrica.



3.6.5. Identificación de interacciones fundamentales e incidentales

En el siguiente diagrama se muestran interacciones no planificadas, pero que pueden tener efectos negativos en el comportamiento del sistema.

Figura 18. Interacciones incidentales.



3.6.6. Arquitectura en diferentes niveles.

La arquitectura a nivel de sistema es predominantemente modular; a nivel de subsistemas la arquitectura es integral, ya que cada uno de los elementos a pesar de estar constituidos por varios elementos, están intrínsecamente unidos, y no pueden reemplazarse con facilidad por otros.

3.6.7. Arquitectura del sistema mecánico.

Con el fin de maximizar la relación resistencia-peso, la cual es muy importante para elevar la capacidad del robot de transportar carga útil, se ha recurrido a la integración, así cada elemento cumplirá diversas funciones, aquí se pierde la modularidad, y se elimina la posibilidad de que estos componentes sean reemplazados por otros con diferentes características.

3.7. DISEÑO INDUSTRIAL.

3.7.1. Valoración del diseño industrial.

3.7.1.1. Ergonómicas

El dispositivo tiene un nivel de complejidad relativamente alto, esto sitúa el mantenimiento fuera del alcance de un usuario sin conocimientos técnicos, reparaciones menores como el cambio de la batería o engrase del mecanismo reductor podrán realizarse con facilidad por parte del usuario.

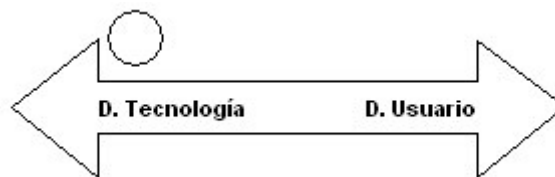
Las consideraciones de seguridad que deben tenerse en cuenta realmente son mínimas, ya que el robot no entrará en contacto con niños o usuarios poco calificados, se han tenido en cuenta, sin embargo, la eliminación de bordes corto-

punzantes, y aislamientos eléctricos adecuados.

3.7.1.2. Estéticas.

Debido a la naturaleza de prototipo altamente experimental, y a la poca probabilidad de que de este se derivará al menos en el corto plazo un producto comercial, factores como el orgullo de posesión, la imagen y la moda no tienen ninguna relevancia para el diseño.

Figura 19. Tendencia del diseño.



Este diseño en particular, a pesar de no ser revolucionario o utilizar tecnología o materiales de última generación es un diseño dominado casi completamente por la tecnología.

3.7.2. Impacto del Diseño Industrial.

3.7.2.1. Interfaces de usuario.

Debido a que la meta principal del proyecto es probar un concepto, y no crear un robot de servicio, la interfaz de usuario es nula, pero se considera la posibilidad de que el robot pueda transportar un computador portátil donde en un futuro puedan realizarse interfaces muy amigables.

3.7.2.2. Requerimientos emocionales.

- El producto expresa calidad.
- EL producto crea orgullo para el diseñador.

3.7.2.3. Facilidades de mantenimiento y reparación.

El mantenimiento del prototipo es complejo debido a la complejidad sistemática, y a la alta integración a nivel de subsistemas, así que, como se mencionó anteriormente el mantenimiento deberá realizarse únicamente por personas con conocimientos técnicos.






3.7.2.4. Uso apropiado de los recursos.

- Los materiales seleccionados son apropiados en términos de costo y calidad.
- No existe sobrediseño, se utilizaron métodos iterados de calculo para el diseño de cada uno de los elementos.
- Todas sus características son necesarias.
- Se han considerado los aspectos ambientales.

3.7.2.5. Diferenciación del producto.

- EL producto puede ser distinguido fácilmente de otros similares.
- El producto no lleva consigo ninguna imagen corporativa.

Cuadro 7. Valoración del diseño industrial.

<i>Categoría</i>	<i>Nivel de Importancia</i>
Calidad de las interfaces de usuario	
Requerimientos emocionales	
Facilidades de mantenimiento	
Uso apropiado de los recursos	
Diferenciación del producto	

3.8. DISEÑO PARA MANUFACTURA Y ENSAMBLE.

3.8.1. Análisis DPM (Diseño Para Manufactura)

Para reducir el peso y los costos de manufactura, a nivel de subsistema, se obtuvo el máximo grado de integración posible, por ejemplo, como puede observarse en la figura del mecanismo cíclico (generación de conceptos) las piernas son movidas por dos cigüeñales, idealmente este cigüeñal debería fabricarse de una sola pieza por fundición, pero debido a la necesidad de colocar rodamientos en cada una de las secciones surgió la necesidad de que el cigüeñal pudiera desensamblarse, para ello se crearon dos tipos de piezas que encajan perfectamente (esto puede detallarse más en la documentación referente al diseño mecánico), una de las piezas realiza varias subfunciones sirve como eje para la rodadura, y tornillo de sujeción para las otras piezas del cigüeñal.

En cuanto al sistema electrónico se diseñó como un módulo independiente para facilitar futuras adiciones o mejoras, y también se buscó un máximo de simplicidad e integración.

3.8.1.1. Lista de Componentes (Preliminar).

Cuadro 8. Lista de componentes (Preliminar)

Componente	Cant idad	Costo Estimado (Unitario)	Costo Estimado (Total)	Estándar
Perfil de Aluminio				Sí
Tubo cuadrado de 25 x 6 m	1	\$ 17.000,00	17000	
Platina de Aluminio 3 x 25 x 6 m	1	\$ 8.000,00	8000	Sí
Tornillo bristol 3 mm	4	\$ 150,00	600	Sí
Tornillo bristol 4 mm	2	\$ 200,00	400	Sí
Tornillo prisionero 5 mm	4	\$ 200,00	800	Sí
Tornillo hexágono 8 mm	4	\$ 500,00	2000	Sí
Tuerca 7 mm	16	\$ 300,00	4800	Sí
Remache pop 1/8"	42	\$ 25,00	1050	Sí
Tornillo Goloso 1/8" x 2"	6	\$ 300,00	1800	Sí
Rodamiento 688/9 17 x 9 x 5	14	\$ 3.000,00	42000	Sí
Motor reductor Bosch de 12 v	1	\$ 200.000,00	200000	Sí
Correa dentada 485 mm	1	\$ 25.000,00	25000	Sí
Polea dentada	2	\$ 100.000,00	200000	No
Bielas (Cigüeñal)	8	\$ 3.000,00	24000	No
Eje roscado simple (cigüeñal)	4	\$ 25.000,00	80000	No
Eje roscado doble (cigüeñal)	4	\$ 50.000,00	160000	No
Eje largo roscado (cigüeñal)	2	\$ 60.000,00	90000	No
Soportes para los rodamientos I	2	\$ 30.000,00	60000	No
Soportes para los rodamientos II	2	\$ 50.000,00	100000	No
Soporte para rodamientos doble	1	\$ 35.000,00	35000	No
Batería	1	\$ 25.000,00	25000	Sí
Tarjeta Sisdei	1	\$ 100.000,00	100000	Sí
Recubrimiento caucho 6 x 15 mm	8	\$ 700,00	5600	No
Total			\$1'171.050	

3.8.1.2. Impacto del diseño para manufactura sobre otros factores.

Se estima que un 65% del tiempo de desarrollo se invirtió en el diseño para manufactura, ya que debía planearse como serían fabricadas las piezas para que tuvieran las características deseadas, pero este tiempo se recuperó durante la construcción del prototipo, ya que se evitó que tuvieran que repetirse piezas debido a un proceso de manufactura equivocado.

Al seleccionar el proceso de manufactura adecuado para cada pieza, se elevaron los niveles de calidad de las piezas individualmente y del conjunto, así por ejemplo, las bielas del cigüeñal fueron fabricadas mediante corte por láser, lo cual redujo increíblemente los costos y elevo la precisión a niveles convenientes para la perfecta sincronización de los movimientos; y los ejes fueron fabricados en una fresadora convencional equipada con un divisor lo que permitió la fabricación de los hexágonos cónicos que darían al cigüeñal la robustez requerida.

3.8.2. Análisis del DPE (Diseño Para Ensamble).

3.8.2.1. Reducción del costo de ensamble.

Tiempo estimado de ensamble: 20 minutos.

$$Indice\ DPE = \frac{No\ Partes\ min * 3s}{Tiempo\ estimado\ para\ ensamble}$$

$$Indice\ DPE = \frac{150 * 3s}{20 * 60s} = 0.375$$

Al integrar componentes también se controlan tolerancias en el proceso de manufactura y se reducen errores en el ensamble, como es el caso del hexágono cónico que permite un ensamble sencillo y garantiza robustez.

3.8.2.2. Maximización de la facilidad de ensamble.

Muchas de las piezas se diseñaron con una alta simetría lo que evita que deban ser reorientadas durante el ensamble, adicionalmente mediante la estandarización de los elementos de sujeción como tornillos y remaches se logró reducir el número de herramientas involucradas en el ensamble.

3.8.2.3. Reglas del DPE

Se especificaron estándares para reducir costos, a la vez que se integraron funciones, al integrar en el eje del cigüeñal una rosca se evitó la necesidad de elementos adicionales de sujeción, que hubieran hecho más complejo y lento el proceso de ensamble.

Las piezas fueron pensadas para que pudieran ser apiladas con facilidad, y para que no sufran daños o se enreden.

3.8.3. Reducción del costo de aseguramiento de la calidad.

Se tuvo en cuenta que las piezas asimétricas no pudieran ser confundidas con otras por ello se exageró la longitud de algunos elementos para asegurar que no pudieran ser ensamblados erróneamente en otro lugar, las piezas que podían ser simétricas lo fueron, para evitar que debieran ser reorientadas.

La cantidad de rodamientos involucrados en la construcción del robot eleva enormemente la complejidad del ensamble, sin embargo, dadas las características de precisión y poca fricción que ofrecían eran indispensables para el funcionamiento del robot.

3.9. PROTOTIPADO

3.9.1. Prototipos iniciales y sus funciones.

Durante el proceso de desarrollo se han generado diversos prototipos:

Prototipo 1: Prototipos del diseño del circuito electrónico, montados en un protoboard. Con el fin de probar el funcionamiento de la electrónica del robot.

Prototipo 2: Prototipos analíticos de los mecanismos usando herramientas como Solid Edge, y su paquete de simulación dinámica.

Prototipo 3: Prototipo analítico del software del microcontrolador que permite el funcionamiento del robot.

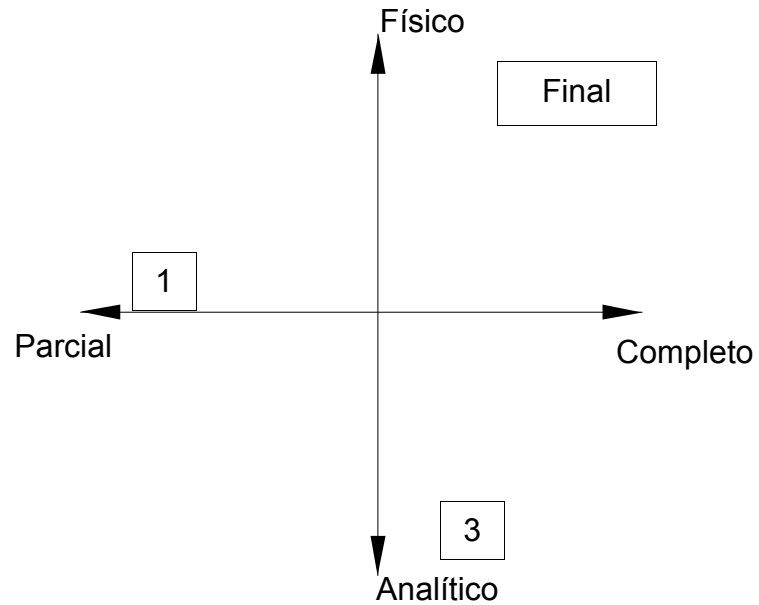
3.9.2. Prototipo a presentar.

El prototipo a presentar podría ser considerado como un prototipo alfa, ya que implementa todas las funciones necesarias, pero los procesos de manufactura por los que fueron fabricados sus elementos podrían diferir si se fabricara como un producto comercial.

Figura 20. Imagen del prototipo.



Figura 21. Clasificación de los prototipos



Se decidió que el prototipo final fuera completo, y que integrara conocimientos adquiridos en muchas de las materias a lo largo de la carrera, sin embargo, como se explica en las conclusiones pueden realizarse modificaciones que darán más libertad al robot, y lo acercarán a la meta de enfrentar cualquier ambiente.

4. DISEÑO MECÁNICO DEL ROBOT.

4.1. ARQUITECTURA GENERAL DEL ROBOT.

Para tratar de simplificar la tarea de diseño de este robot, las dos funciones más importantes a realizarse (mantener el equilibrio y caminar) son desempeñadas integralmente por la mecánica del dispositivo, y no por complejos sistemas electrónicos, es decir, la estabilidad es una característica inherente a la estructura y no depende de la supervisión de un sistema de control.

En el capítulo 2, se hizo mención de la fase aérea de la marcha, la naturaleza ha logrado solucionar el problema de la estabilidad en los animales a través de técnicas de compensación dinámica, es decir, es el propio movimiento del animal, lo que crea su equilibrio, esto es complejo, y aún no completamente comprendido, en este proyecto se siguió el camino contrario, crear un dispositivo estable estáticamente en cualquiera de sus posibles posiciones, y considerar cualquier fuerza resultante de la dinámica del dispositivo como una perturbación que el sistema debía absorber ante la inexistencia de sistemas de compensación.

4.2. DISEÑO MECÁNICO DEL BÍPEDO

Para la realización de cálculos preliminares que permitan la selección de materiales y dimensiones para cada uno de los elementos que conforman la estructura del robot, se analizó el robot como un conjunto de elementos que están sometidos a fatiga debido a las cargas y a movimientos repetidos, el peso de la estructura no se despreciará con respecto al de la carga.

Para comenzar se calcularán las dimensiones y se seleccionará el material del que deberán fabricarse las piernas, para unos valores de carga estimados.

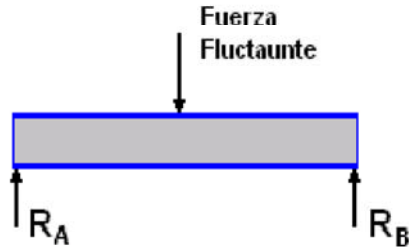
Figura 22. Imagen de la pierna.



Figura 23. Imagen del pie.



Figura 24. Diagrama de cargas.



La fuerza F es variable en el tiempo. En el primer momento del movimiento (cuando la pierna está levantada), el elemento está sometido únicamente al esfuerzo que produce su propio peso. En el segundo momento, sobre este elemento descansa toda la estructura. El elemento poseerá puntos de apoyo sólo en sus extremos. Es evidente que las reacciones en cada extremo son iguales entre sí, y equivalen a la mitad de la fuerza F , que se está ejerciendo en ese momento. En caso extremo el valor de F es el peso del robot más su carga útil (P_{total}).

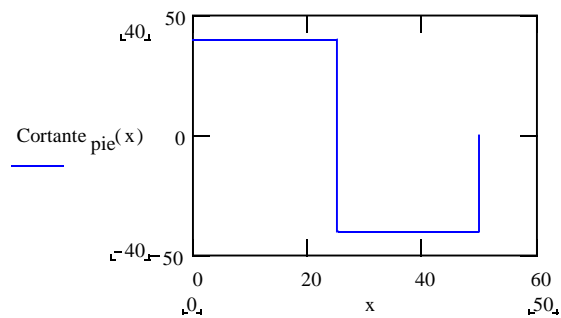
$$P_{\text{total}} := 80 \text{ N}$$

$$L_{\text{pie}} := 50 \text{ cm}$$

$$x := 0, 0.05 \cdot \frac{L_{\text{pie}}}{\text{cm}}$$

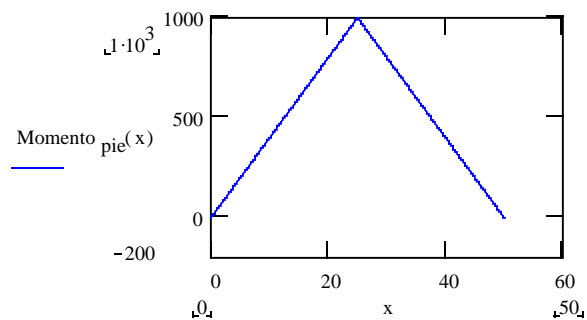
$$\text{Cortante}_{\text{pie}}(x) := \frac{P_{\text{total}}}{2} - (P_{\text{total}}) \cdot \Phi \left(x - \frac{L_{\text{pie}}}{2 \text{ cm}} \right) + \frac{P_{\text{total}}}{2} \cdot \Phi \left(x - \frac{L_{\text{pie}}}{\text{cm}} \right)$$

Figura 25. Diagrama de Cortante.



$$\text{Momento}_{\text{pie}}(x) := \frac{P_{\text{total}}}{2} \cdot x - P_{\text{total}} \cdot \left(x - \frac{L_{\text{pie}}}{2 \text{ cm}} \right) \cdot \Phi \left(x - \frac{L_{\text{pie}}}{2 \text{ cm}} \right)$$

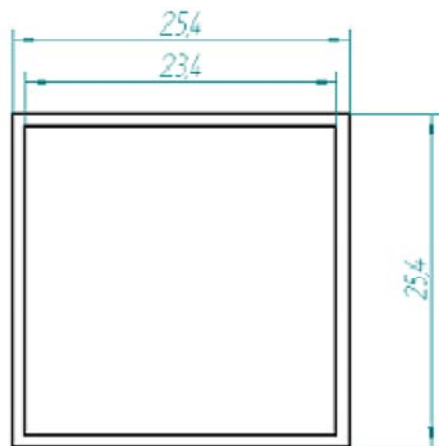
Figura 26. Diagrama de Momentos



Como se mencionó anteriormente, el esfuerzo al que esta sometido este elemento, es variable en el tiempo, por lo cual es necesario determinar el rango de valores en el que oscila. Para el primer momento del movimiento el esfuerzo al que se somete el elemento es producido únicamente por su propio peso, así que se considerara este valor como el limite inferior de la variación del esfuerzo y con signo negativo por su tendencia a flectar el elemento en sentido contrario al que produce la carga.

Un diseño tentativo para este elemento podría ser un perfil tubular cuadrado de aluminio, cuyas dimensiones se suponen a continuación:

Figura 27. Gráfica del perfil



Seccion := 25 mm

Espesor := 1 mm

$$\rho_{al} := 2800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

4.2.1. Cálculo del Momento de Inercia (I)

Debe calcularse ahora el momento de Inercia I para la geometría seleccionada, para ello dividimos la figura en partes de las cuales se conozca o se pueda calcular I , en este caso la diferencia de dos cuadrados:

$$A_1 := (\text{Seccion})^2$$

$$A_1 = 6.25 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$i_1 := \frac{\text{Seccion}^4}{12}$$

$$i_1 = 3.255 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$$

$$A_2 := (\text{Seccion} - 2 \cdot \text{Espesor})^2$$

$$A_2 = 5.29 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$i_2 := \frac{A_2^2}{12}$$

$$i_2 = 2.332 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$$

$$A_t := A_1 - A_2$$

$$A_t = 9.6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$i_t := i_1 - i_2$$

$$i_t = 9.232 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4$$

El momento de Inercia del perfil es $i_t = 9.232 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4$, y la distancia a la fibra mas externa c es:

$$c := \frac{\text{Seccion}}{2}$$

$$c = 0.013 \text{ m}$$

$$F_{\min_{\text{pie}}} := -\rho a l \cdot A_t \cdot L_{\text{pie}} \cdot g$$

$$F_{\min_{\text{pie}}} = -1.318 \text{ N}$$

4.2.2. Cálculo de Fuerzas

Para el segundo momento del movimiento, el esfuerzo es producido por el peso mismo de la estructura más la carga útil, total que se había estimado como 80 N.

$$F_{\max_{\text{pie}}} := P_{\text{total}}$$

$$F_{\max_{\text{pie}}} = 80 \text{ N}$$

Se calculan ahora los valores medio y alternante para dicha fuerza:

$$F_{m_{\text{pie}}} := \frac{F_{\max_{\text{pie}}} + F_{\min_{\text{pie}}}}{2}$$

$$F_{m_{\text{pie}}} = 39.341 \text{ N}$$

$$F_{a_{\text{pie}}} := \frac{F_{\max_{\text{pie}}} - F_{\min_{\text{pie}}}}{2}$$

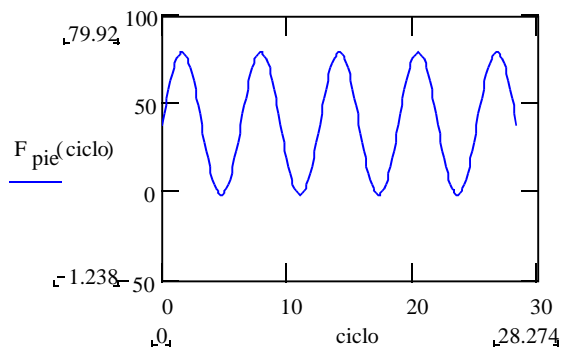
$$F_{a_{\text{pie}}} = 40.659 \text{ N}$$

Dado que ni la carga media, ni la carga alternante son cero, se puede decir que este elemento esta sometido a un esfuerzo fluctuante.

$$\text{ciclo} := 0, \frac{2 \cdot \pi}{50} \dots 9 \cdot \pi$$

$$F_{\text{pie}}(\text{ciclo}) := F_{a_{\text{pie}}} \cdot \sin(\text{ciclo}) + F_{m_{\text{pie}}}$$

Figura 28. Esfuerzo cíclico fluctuante.



Debe también calcularse ahora el número de ciclos de carga que el elemento experimentará en su vida de servicio.

Se estima que el robot tardará aproximadamente 2s en dar un paso, y se suponen 20 años de funcionamiento continuo.

$$T_{\text{paso}} := 2 \text{ s}$$

$$N_{\text{ciclos pie}} := \frac{365 \cdot 20 \cdot \text{day}}{T_{\text{paso}}}$$

$$N_{\text{ciclos pie}} = 3.154 \cdot 10^8$$

El perfil posee una sección continua y no es necesario, maquinarla o debilitarla en ninguna sección, por tanto, no existe factor de concentración de esfuerzos K_t para este elemento, ni factor de concentración a la fatiga K_f .

A partir de los valores de carga media y alternante se calculan los valores medio y alternantes para cada reacción.

$$R_{2a \text{ pie}} := \frac{F_{a \text{ pie}}}{2}$$

$$R_{1a \text{ pie}} := \frac{F_{a \text{ pie}}}{2}$$

$$R_{2a \text{ pie}} = 20.33 \text{ N}$$

$$R_{1a \text{ pie}} = 20.33 \text{ N}$$

$$R_{2m \text{ pie}} := \frac{F_{m \text{ pie}}}{2}$$

$$R_{1m \text{ pie}} := \frac{F_{m \text{ pie}}}{2}$$

$$R_{2m \text{ pie}} = 19.67 \text{ N}$$

$$R_{1m \text{ pie}} = 19.67 \text{ N}$$

$$R_{2\max \text{ pie}} := \frac{F_{\max \text{ pie}}}{2}$$

$$R1_{\max_{\text{pie}}} := \frac{F_{\max_{\text{pie}}}}{2}$$

$$R2_{\max_{\text{pie}}} = 40 \text{ N}$$

$$R1_{\max_{\text{pie}}} = 40 \text{ N}$$

Y con estos, se calculan los momentos medio, alternante y máximo que actúan sobre el elemento.

$$M_{a_{\text{pie}}} := (F_{a_{\text{pie}}} - R1_{a_{\text{pie}}}) \cdot \frac{L_{\text{pie}}}{2}$$

$$M_{a_{\text{pie}}} = 5.082 \text{ J}$$

$$M_{m_{\text{pie}}} := (F_{m_{\text{pie}}} - R1_{m_{\text{pie}}}) \cdot \frac{L_{\text{pie}}}{2}$$

$$M_{m_{\text{pie}}} = 4.918 \text{ J}$$

$$M_{\max_{\text{pie}}} := (F_{\max_{\text{pie}}} - R1_{\max_{\text{pie}}}) \cdot \frac{L_{\text{pie}}}{2}$$

$$M_{\max_{\text{pie}}} = 10 \text{ J}$$

Los esfuerzos a flexión nominales en la base se determinan tanto para la carga alternante como para la carga media.

$$\sigma_{a_{\text{nom}}} := \frac{M_{a_{\text{pie}}} \cdot c}{i_t}$$

$$\sigma_{a_{\text{nom}}} = 6.881 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{m_{\text{nom}}} := \frac{M_{m_{\text{pie}}} \cdot c}{i_t}$$

$$\sigma_{m_{\text{nom}}} = 6.658 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

Calculamos los esfuerzos de Von Misses alternante y medio.

$$\sigma_{a_{\text{nomx}}} := \sigma_{a_{\text{nom}}}$$

$$\sigma_{a\ nomy} := 0 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{a\ nomx} = 6.881 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$\tau_{xya} := 0 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{pa} := \sqrt{\sigma_{a\ nomx}^2 + \sigma_{a\ nomy}^2 - \sigma_{a\ nomx} \cdot \sigma_{a\ nomy} + 3 \cdot \tau_{xya}^2}$$

$$\sigma_{pa} = 6.881 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{m\ nomx} := \sigma_{m\ nom}$$

$$\sigma_{m\ nomy} := 0 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{m\ nomx} = 6.658 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$\tau_{xym} := 0 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{pm} := \sqrt{\sigma_{m\ nomx}^2 + \sigma_{m\ nomy}^2 - \sigma_{m\ nomx} \cdot \sigma_{m\ nomy} + 3 \cdot \tau_{xym}^2}$$

$$\sigma_{pm} = 6.658 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

Se calculará ahora el limite de la resistencia a la fatiga, para ello se estima el limite de resistencia a la fatiga sin corregir S_f' , y varios factores como tamaño, carga, superficie, temperatura, confiabilidad.

$$S_{ut} := 110 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

Aluminio 3003, recocido en hoja

$$S_{fp} := 0.4 \cdot S_{ut}$$

$$S_{fp} = 4.4 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$

Calculo del diámetro equivalente:

$$A_{95} := 0.05 \cdot A_t$$

$$A_{95} = 4.8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$d_{equiv} := \sqrt{\frac{A_{95}}{0.766}}$$

$$d_{\text{equiv}} = 2.503 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Dado que el diámetro equivalente es menor a 8 mm, $C_{\text{tamaño}}=1$.

$$C_{\text{tamaño}} := 1$$

Dado que la carga produce flexión, $C_{\text{carga}}=1$

$$C_{\text{carga}} := 1$$

Para Aluminio maquinado en frío podemos considerar los mismos factores que para el acero, dado que no se utilizara en un aplicación critica, o en condiciones muy rigurosas.

$$A_{\text{sup}} := 4.51$$

$$b_{\text{sup}} := -0.265$$

$$C_{\text{sup}} := A_{\text{sup}} \cdot \left(\frac{S_{\text{ut}}}{10^6 \text{ Pa}} \right)^{b_{\text{sup}}}$$

$$C_{\text{sup}} = 1.298$$

No es recomendable tomar este factor como un valor mayor que 1, ya que tiende a disminuir la robustez del diseño, por ello, se ajusta a 1.

$$C_{\text{sup1}} := 1$$

Para trabajo a temperaturas menores a 450°C, $C_{\text{temp}}=1$

$$C_{\text{temp}} := 1$$

Se ha seleccionado para este diseño una confiabilidad de 99.9%, así que el $C_{\text{conf}}=0.753$

$$C_{\text{conf}} := 0.753$$

El limite de resistencia a la fatiga corregido se calcula como el producto de los factores y el limite calculo antes (sin corregir):

$$S_f := C_{\text{tamaño}} \cdot C_{\text{carga}} \cdot C_{\text{supl}} \cdot C_{\text{temp}} \cdot C_{\text{conf}} \cdot S_{fp}$$

$$S_f = 3.313 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$

Curva S-N

Se estiman los valores de resistencia del material a bajo ciclaje S_m

$$S_m := 0.9 \cdot S_{ut}$$

A flexión

$$S_m = 9.9 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$

Se tabulan datos para generar la Curva S_n

$$n_{ic} := 3..9$$

Desde bajo hasta alto ciclaje $\log(n_{ic})$

Se calculan las constantes de la función: $S_n = a_n \cdot (N_{ciclos})^{b_n}$

$$b_n := \frac{1}{(\log(1000) - \log(5 \cdot 10^8))} \cdot \log\left(\frac{S_m}{S_f}\right)$$

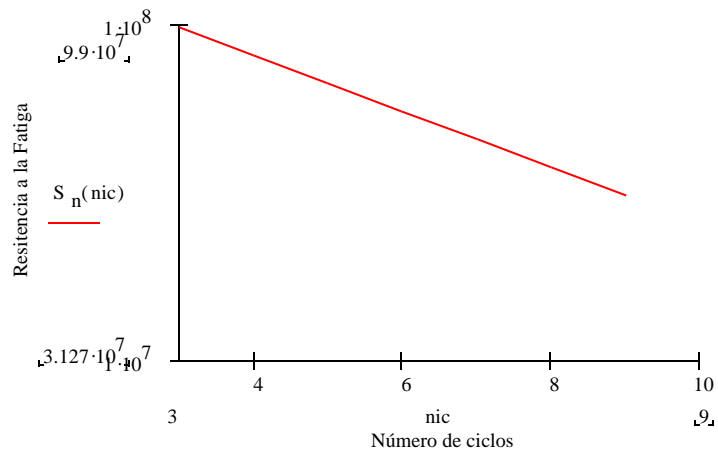
$$b_n = -0.083$$

$$a_n := 10^{\left(\log\left(\frac{S_m}{\text{Pa}}\right) - 3 \cdot b_n\right)}$$

$$a_n = 1.762 \cdot 10^8$$

$$S_n(n_{ic}) := a_n \cdot (10^{n_{ic}})^{b_n}$$

Figura 29. Curva S-N para el aluminio (Semilogaritmica)



Para el caso del elemento en cuestión

$$S_{n_pie} := a_n \cdot (N_{ciclos_pie})^{b_n} \text{ Pa}$$

$$S_{n_pie} = 3.443 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$

$$S_f = 3.313 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$

$$N_{ciclos_pie_t} := 10^{\frac{\log\left(\frac{S_f}{Pa}\right) - \log(a_n)}{b_n}}$$

$$N_{ciclos_pie_t} = 5 \cdot 10^8$$

Aquí es posible verificar que el elemento tendrá una vida de 5e8 ciclos, valor ligeramente mayor al esperado.

4.2.3. Factor de Seguridad y Deflexión Máxima

Los componentes alternantes y medios tiene una relación constante a lo largo de la vida de la pieza. El factor de seguridad más pequeño se calcula como sigue:

$$F_s := \frac{S_f \cdot S_{ut}}{\sigma_{pa} \cdot S_{ut} + \sigma_{pm} \cdot S_f}$$

$$F_s = 3.728$$

$$E_{al} := 71.7 \cdot 10^9 \text{ Pa}$$

Modulo de Elasticidad

$$\text{Defl_max}_{pie} := \frac{F_{max_pie} \cdot L_{pie}^3}{192 \cdot E_{al} \cdot I_t}$$

$$\text{Defl_max}_{pie} = 7.868 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

4.2.4. Torsión

Para el diseño de este elemento se ha considerado que esta sometido únicamente a un esfuerzo de flexión, pero durante el andar del robot, la naturaleza del esfuerzo al que esta sometido este elemento puede cambiar, dado que si uno de los apoyos durante su aproximación al suelo, tocara un obstáculo, el elemento estaría sometido entonces a torsión que produce cortante, esta es una situación esporádica y por ello no se realizo el análisis de esfuerzos como una combinación de flexión y torsión.

Se calcula ahora el ángulo de torsión para este caso.

$$L_{apoyo} := 22 \text{ cm}$$

$$\text{Torque} := P_{total} \cdot L_{apoyo}$$

$$\text{Torque} = 17.6 \text{ J}$$

$$K_{\text{perfil}} := \frac{2 \cdot \text{Espesor} \cdot (\text{Seccion} - \text{Espesor})^4}{2 \cdot \text{Seccion} - 2 \cdot \text{Espesor}}$$

$$K_{\text{perfil}} = 1.382 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$$

$$L_{\text{pie}} = 0.5 \text{ m}$$

$$G_{\text{al}} := 26.8 \cdot 10^9 \text{ Pa}$$

Modulo de rigidez

$$\theta_{\text{pie}} := \frac{180 \cdot \text{Torque} \cdot L_{\text{pie}}}{\pi \cdot G_{\text{al}} \cdot K_{\text{perfil}}}$$

$$\theta_{\text{pie}} = 1.361$$

Este ángulo de torsión es pequeño, ya que produce una desviación de solo 0.5 mm, al final del elemento de apoyo.

4.2.5. Conclusión de la selección del perfil.

Después de varias iteraciones y cambios en la selección del perfil, se obtienen estos resultados, la deflexión máxima es menor a una décima de milímetro, el número de ciclos supera al esperado de 20 años de funcionamiento continuo, y un factor de seguridad bastante bueno. Entre los perfiles que se propusieron se encontraba un perfil tubular de aluminio de 16mm, que brindaba un factor de seguridad de 1.7, que era suficiente, pero al seleccionar uno de una pulgada, valor más comercial, se duplicaba el factor de seguridad y solo se añadían 15g al peso del elemento (12.6%)

4.2.6. Apoyos

Para la parte restante del pie, los apoyos, están sometidos a las mismas cargas, pero su longitud es menor, y por tanto experimentan un momento flexionante menor, además estos esfuerzos se reparten entre los dos elementos, así que puede seleccionarse un perfil menos resistente para estos elementos, pero por simplicidad en el ensamblaje no se modificará el perfil seleccionado.

4.2.7. Diseño de la pierna

La pierna en este robot es realmente una columna, ya que no posee una articulación que la divida en dos, lo que podría considerarse como una rodilla en este tipo de robot, realmente posee el eje de rotación paralelo a la pierna, y esta situada en la parte alta de la pierna. A continuación se muestra el diseño para este elemento.

$$K_{\text{pierna}} := 2.1$$

Columna con un extremo fijo y el otro libre

$$L_{\text{pierna}} := 56 \text{ cm}$$

$$L_{\text{e pierna}} := K_{\text{pierna}} \cdot L_{\text{pierna}}$$

Largo efectivo de la pierna

Suponiendo el uso del mismo perfil que se calculo para el pie.

$$\text{Seccion } 2 := 25.4 \text{ mm}$$

$$\text{Espesor } 2 := 1 \text{ mm}$$

$$I_{\text{pierna}} := \frac{\text{Seccion } 2^4 - (\text{Seccion } 2 - \text{Espesor } 2)^4}{12}$$

$$A_{\text{pierna}} := \text{Seccion } 2^2 - (\text{Seccion } 2 - \text{Espesor } 2)^2$$

$$A_{\text{pierna}} = 4.98 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$r_{\min} := \sqrt{\frac{I_{\text{pierna}}}{A_{\text{pierna}}}}$$

$$r_{\min} = 0.01 \text{ m}$$

$$E_{\text{al}} = 7.17 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$$

$$SR_{\max} := \frac{L_{\text{e pierna}}}{r_{\min}}$$

Razón de esbeltez

$$S_{y_{\text{al}}} := 41 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

Constante de columna

$$C_c := \sqrt{\frac{2 \pi^2 E_{\text{al}}}{S_{y_{\text{al}}}}}$$

$$SR_{\max} = 115.663$$

$$C_c = 185.794$$

De la comparación entre la constante de la columna y la razón de esbeltez, se concluye que la columna es corta, y se utiliza entonces la formula de Johnson.

$$P_{\text{cr pierna}} := A_{\text{pierna}} \cdot S_{y_{\text{al}}} \cdot \left(1 - \frac{S_{y_{\text{al}}} \cdot SR_{\max}^2}{4 \cdot \pi^2 E_{\text{al}}} \right)$$

$$P_{\text{cr pierna}} = 1.646 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Es decir, la columna puede soportar 164.6 kg, este calculo fue realizado como si el peso se concentrara en un punto que esta a lo largo del eje principal de la columna. Para ello se aplica la expresión de esfuerzo para columnas excéntricas.

$$\sigma_{al} := 41 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

Esfuerzo de compresión, limite de fluencia

$$exc := 12.5 \text{ cm}$$

Excentricidad , distancia entre la carga y el eje.

$$P_{cr} := 80 \text{ N}$$

$$\sigma_c := \frac{P_{cr}}{A_{pierna}} \cdot \left(1 + \frac{exc \cdot c}{r_{min}^2} \cdot \sec \left(\frac{L_{pierna}}{r_{min}} \cdot \sqrt{\frac{P_{cr}}{4 \cdot E_{al} \cdot A_{pierna}}} \right) \right)$$

$$\sigma_{al} = 4.1 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$

$$\sigma_c = 2.609 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$

$$S_f = 3.313 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$

$$P_{cr} = 8.158 \cdot \text{kgf}$$

Se calculará ahora el peso total de la pierna sumando los pesos de cada uno de los elementos: pie, pierna (columna) y 2 apoyos

$$\text{Peso}_{pie} := \rho_{al} \cdot g \cdot L_{pie} \cdot A_t$$

$$\text{Peso}_{pie} = 1.318 \text{ N}$$

$$\text{Peso}_{apoyo} := \rho_{al} \cdot g \cdot L_{apoyo} \cdot A_t$$

$$\text{Peso}_{apoyo} = 0.58 \text{ N}$$

$$\text{Peso}_{pierna} := \rho_{al} \cdot g \cdot L_{pierna} \cdot A_{pierna}$$

$$\text{Peso}_{pierna} = 0.766 \text{ N}$$

$$P_{total\ pierna} := \text{Peso}_{pie} + 2 \cdot \text{Peso}_{apoyo} + \text{Peso}_{pierna}$$

$$P_{total\ pierna} = 3.244 \text{ N}$$

El peso total de la estructura que conforma una pierna es de 346 gramos.

La carga máxima es de 38 kg para condiciones estáticas, se calculará para

condiciones de fatiga

$$P_{\text{actuador}} := 0.5 \text{ kgf}$$

$$F_{\text{min pierna}} := P_{\text{total pierna}} + P_{\text{actuador}}$$

$$F_{\text{max pierna}} := P_{\text{total}}$$

$$F_{\text{a pierna}} := \frac{F_{\text{max pierna}} - F_{\text{min pierna}}}{2}$$

$$F_{\text{m pierna}} := \frac{F_{\text{max pierna}} + F_{\text{min pierna}}}{2}$$

$$\sigma_a := \frac{F_{\text{a pierna}}}{A_{\text{pierna}}} \cdot \left(1 + \frac{\text{exc} \cdot c}{r_{\text{min}}^2} \cdot \sec \left(\frac{L_{\text{pierna}}}{r_{\text{min}}} \cdot \sqrt{\frac{F_{\text{a pierna}}}{4 \cdot E_{\text{al}} \cdot A_{\text{pierna}}}} \right) \right)$$

$$\sigma_a = 1.167 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$

$$\sigma_m := \frac{F_{\text{m pierna}}}{A_{\text{pierna}}} \cdot \left(1 + \frac{\text{exc} \cdot c}{r_{\text{min}}^2} \cdot \sec \left(\frac{L_{\text{pierna}}}{r_{\text{min}}} \cdot \sqrt{\frac{F_{\text{m pierna}}}{4 \cdot E_{\text{al}} \cdot A_{\text{pierna}}}} \right) \right)$$

$$\sigma_m = 1.432 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$

Calculo del factor de Seguridad

$$F_{\text{s pierna}} := \frac{S_f \cdot S_{\text{ut}}}{\sigma_a \cdot S_{\text{ut}} + \sigma_m \cdot S_f}$$

$$F_{\text{s pierna}} = 2.073$$

4.2.8. Transmisión de potencia a las piernas

Para lograr el movimiento del robot es necesario dotarlo de actuadores, para este caso motores eléctricos de corriente continua, la mayor ventaja del diseño propuesto sobre un bípedo más antropomórfico sea quizás, la posibilidad de lograr el andar del robot con un único motor, lo cual simplifica la lógica de control, reduce costos, reduce peso, aumentando la carga útil.

Tener un actuador que provea de fuerza motriz no es suficiente, es indispensable transmitir ese movimiento a los elementos responsables de la marcha, las piernas. Dado que el movimiento para las dos piernas es idéntico, pero esta fuera de fase 180° , se decidió utilizar un cigüeñal, que recibiría el movimiento de rotación directamente del motor, y lo transmitiría hacia ambas piernas.

En el diseño propuesto, las piernas siempre se encuentran perpendiculares al suelo mientras realizan su movimiento cíclico de ascenso y avance, descenso y retroceso, esto no es posible con la utilización del cigüeñal como único medio de transmisión de potencia, existen diversas soluciones para este problema pero introducen fricción, la solución más conveniente es la utilización de un segundo cigüeñal sincronizado con el primero, cada pierna esta conectada a ambos cigüeñales a través de un elemento que posee rodamientos para cada cigüeñal, el cual se conocerá como unión, este garantiza que la pierna este siempre orientada perpendicular al suelo, con un mínimo de fricción. La utilización de un segundo cigüeñal ofrece una ventaja adicional, mayor estandarización de los elementos utilizados para el robot.

Figura 30. Cigüeñal



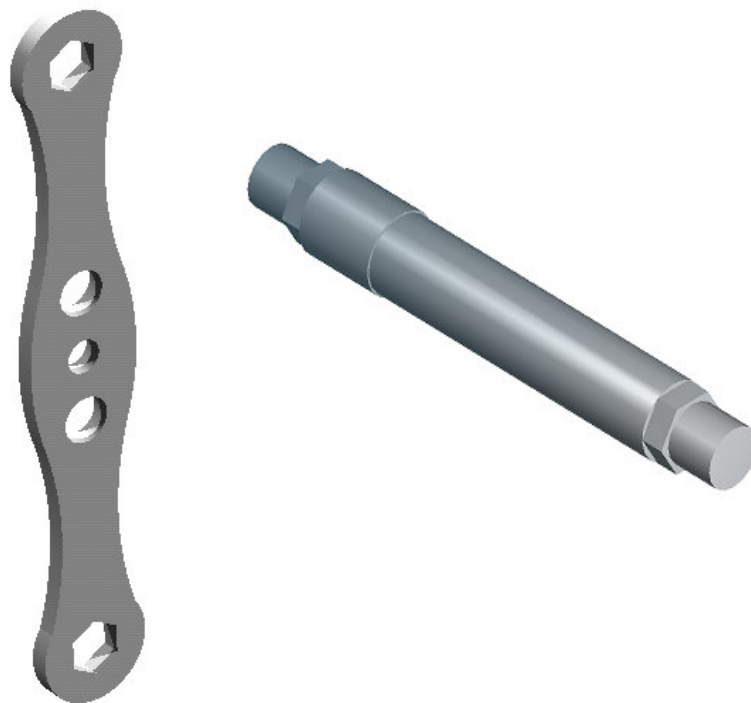
4.2.9. Diseño Mecánico del Cigüeñal.

El diseño del cigüeñal es un desafío singular dada la naturaleza de los esfuerzos que están presentes durante un ciclo de su movimiento, adicionalmente este es muy diferente de los que se utilizan regularmente en ingeniería, dado que a diferencia de los usados en los motores de combustión interna las bielas no poseen una masa exagerada para dar balance al movimiento irregular de los pistones, por tanto el diseño debe minimizar la masa y garantizar la resistencia mecánica; adicionalmente al tener que servir como eje para rodamientos, no puede realizarse por los procesos habituales de fabricación, como fundición o a partir de elementos unidos por soldadura, este cigüeñal debe poder desensamblarse, esto aumenta la complejidad del diseño, ya que deben calcularse además los puntos que servirán de unión a los elementos que forman el cigüeñal.

4.2.10. Elementos del cigüeñal.

Debido a la necesidad de colocar rodamientos sobre las diferentes secciones del cigüeñal, este debe poder ser ensamblado y desensamblado, conservando la alineación de sus piezas, así, se fabricaron dos clases de piezas, la primera, las bielas, que están fabricadas a partir de laminas de acero, que mediante corte por láser fueron perforadas de forma hexagonal, para dar entrada y anclar con firmeza a la segunda clase de elemento, los ejes, fabricados a partir de varilla de aluminio, y maquinado de forma hexagonal en sus extremos, los cuales se introducirán en los agujeros de las bielas, y aún más en el extremo son elementos roscados lo que permitirá sujetar con tuercas ambas piezas.

Figura 31. Elementos del cigüeñal.



4.2.11. Las bielas.

Las bielas son, en este diseño, las responsables de transmitir la fuerza motriz hacia las piernas, se utilizan cuatro por cada pierna, las cuales están siempre en fase, es decir, tienen la misma posición angular, se garantiza así, que las piernas estén siempre normales al suelo.

Se consideró para el análisis que estos elementos están sometidos a fatiga por torsión y flexión combinadas, los valores para el esfuerzo de torsión oscilan entre un mínimo, cuando la pierna correspondiente se halla levantada, y por tanto es la única carga para las bielas, y un valor máximo, cuando la pierna se encuentra apoyada en el suelo, es decir, a través de las bielas se transmite la carga a la pierna; mientras que el esfuerzo de flexión es máximo un instante antes que la pierna toque el suelo, es decir, los esfuerzos de torsión y flexión están fuera de fase 90°.

Se supondrá como material para la fabricación de las bielas acero, y la siguiente geometría:

- La biela será una barra plana, de sección constante, y libre de muescas.
- Dado que la biela deberá girar solidariamente con el eje, se realizará una perforación con forma poligonal en la que se introducirá a presión uno de los extremos del eje que también ha sido maquinado en forma poligonal, además de sujetarse con una tuerca que se introducirá en una sección roscada del eje.

Dimensiones de la biela

$$\rho_{\text{biela}} := 7800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$L_{\text{biela}} := 11.5 \text{ cm}$$

$$W_{\text{biela}} := 15 \text{ mm}$$

$$H_{\text{biela}} := 4 \text{ mm}$$

$$\text{Peso}_{\text{biela}} := \rho_{\text{biela}} \cdot L_{\text{biela}} \cdot W_{\text{biela}} \cdot H_{\text{biela}}$$

$$\text{Peso}_{\text{biela}} = 0.054 \text{ kg}$$

El número de ciclos que se considerará para la realización del análisis será el mismo que para el resto de los elementos del robot.

$$N_{\text{ciclos}_{\text{biela}}} := N_{\text{ciclos}_{\text{pie}}}$$

$$N_{\text{ciclos}_{\text{biela}}} = 3.154 \cdot 10^8$$

Dado que el material a utilizar es acero, y este posee un codo en la gráfica S-N se debe calcular su límite de resistencia a la fatiga S_e .

$$S_{\text{ut}_{\text{biela}}} := 4.69 \cdot 10^8 \text{ Pa}$$

$$S_{\text{ep}_{\text{biela}}} := 0.5 \cdot S_{\text{ut}_{\text{biela}}}$$

$$S_{\text{ep}_{\text{biela}}} = 2.345 \cdot 10^8 \text{ Pa}$$

Ahora se estiman los factores de corrección para determinar el valor real de la resistencia a la fatiga.

La biela está sometida a carga axial, y por flexión. como factor se toma el más bajo, que es de la carga axial.

$$C_{\text{carga2}} := 0.7$$

Debido a que parte de la carga es axial, se puede considerar el factor de tamaño como 1, pero para la flexión debe ser calculado, para ello, primero debe hallarse el diámetro equivalente de la sección rectangular de la biela.

$$d_{\text{equiv2}} := \sqrt{\frac{0.05 \cdot W_{\text{biela}} \cdot H_{\text{biela}}}{0.0766}}$$

$$d_{\text{equiv2}} = 6.258 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Utilizando el criterio de Shigley y Mitchell, para diámetros entre 8 y 250 mm

$$C_{\text{tamaño2}} := 1.189 \left[\frac{d_{\text{equiv2}}}{(10^{-3} \text{ m})} \right]^{-0.097}$$

$$C_{\text{tamaño2}} = 0.995$$

Suponiendo una superficie maquinada se calcula el factor de superficie, al igual que para los elementos calculados anteriormente, también se conservaran los factores de temperatura y confiabilidad.

$$C_{\text{sup2}} := 1$$

$$C_{\text{temp}} = 1$$

$$C_{\text{conf}} = 0.753$$

$$S_{f2} := C_{\text{carga2}} \cdot C_{\text{tamaño2}} \cdot C_{\text{sup2}} \cdot C_{\text{temp}} \cdot C_{\text{conf}} \cdot S_{\text{ep_biela}}$$

$$S_{f2} = 1.23 \cdot 10^8 \text{ Pa}$$

Curva S-N

Se estiman los valores de resistencia del material a bajo ciclaje S_m

$$S_{m2} := 0.9 \cdot 0.75 \cdot S_{ut_biela}$$

Flexión y Carga axial combinadas

$$S_{m2} = 3.166 \cdot 10^8 \text{ Pa}$$

Se tabulan datos para generar la Curva S_n

$$n_{ic} := 3..9$$

Desde bajo hasta alto ciclaje $a_{log}(n_{ic})$

Se calculan las constantes de la función: $S_n = a_n \cdot (N_{ciclos})^{b_n}$

$$b_{n2} := \frac{1}{(\log(1000) - \log(5 \cdot 10^8))} \cdot \log\left(\frac{S_{m2}}{S_{f2}}\right)$$

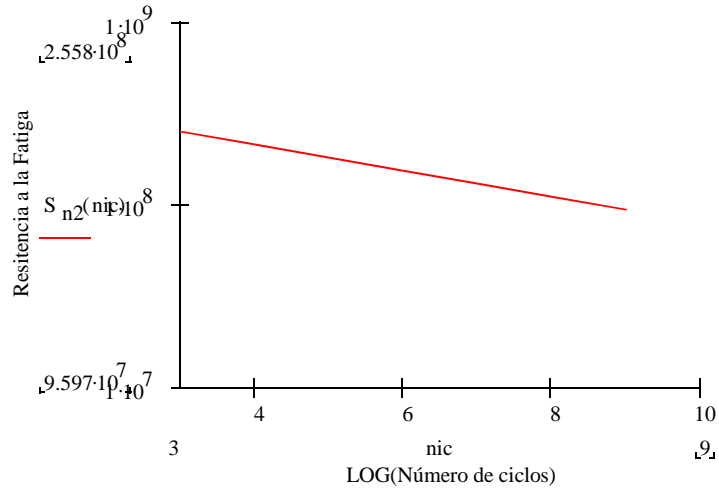
$$b_{n2} = -0.072$$

$$a_{n2} := 10^{\left(\log\left(\frac{S_{m2}}{\text{Pa}}\right) - 3 \cdot b_{n2}\right)}$$

$$a_n = 1.762 \cdot 10^8$$

$$S_{n2}(n_{ic}) := a_{n2} \cdot (10^{n_{ic}})^{b_{n2}}$$

Figura 32. Curva S-N para el aluminio a flexión y carga axial.



Para el caso del elemento en cuestión

$$S_{n_biela} := a_{n2} \cdot (N_{ciclos_biela})^{b_{n2}} \text{ Pa}$$

$$S_{n_biela} = 1.272 \cdot 10^8 \text{ Pa}$$

$$S_{f2} = 1.23 \cdot 10^8 \text{ Pa}$$

$$N_{ciclos_biela_t} := 10^{\frac{\log\left(\frac{S_{f2}}{Pa}\right) - \log(a_{n2})}{b_{n2}}}$$

$$N_{ciclos_biela_t} = 5 \cdot 10^8$$

Se verifica así que la vida del elemento será la misma que para el resto del robot.

4.2.12. Procedimiento Alternativo de Diseño para la Biela

Los esfuerzos multiaxiales complejos siguen siendo objeto de investigación en la actualidad, aquí se utilizó un método propuesto por los investigadores japoneses Nishikara y Kawamoto, descrito en el ASME Boiler Code; se utilizó este método

debido a que es el único que tiene en cuenta la existencia de un desfase entre los diferentes esfuerzos.

Las bielas que se utilizarán para transmitir el movimiento del motor hacia las piernas, están sometidas a esfuerzos multiaxiales complejos, la distancia entre el plano en el que la biela rota y el centro de masa del robot, originan una combinación de flexión y torsión.

La flexión es máxima cuando el cuerpo del robot esta completamente elevado, es decir, a la mitad de un paso; y la torsión es máxima en los instantes en los que comienza y termina la elevación del cuerpo del robot, los dos esfuerzos son fluctuantes, pero están fuera de fase $\pi/2$ o 90° .

Los factores de concentración de esfuerzos para flexión se calculan así:

$$d_{\text{ext_buj}} := 9 \text{ mm}$$

$$d_h := \frac{d_{\text{ext_buj}}}{H_{\text{biela}}}$$

$$d_h = 2.25$$

$$d_w := \frac{d_{\text{ext_buj}}}{W_{\text{biela}}}$$

$$d_w = 0.6$$

A partir del valor de d_h se establecen las siguientes constantes:

$$A_{kt_{\text{biela}}} := 2.1056$$

$$b_{kt_{\text{biela}}} := -0.79878$$

y con estas se calcula, el factor de concentración de esfuerzos para una barra plana con una perforación transversal sometida a flexión.

$$k_{t_biela} := A_{k_{t_biela}} \cdot e^{(b_{k_{t_biela}} \cdot d_w)}$$

$$k_{t_biela} = 1.304$$

Para convertir estos factores de concentración de esfuerzos estáticos, a factores de fatiga, se debe hallar la sensibilidad a las muescas del material q , para ello usamos las constantes de Neuber, en este caso, para acero.

$$S_{ut_biela} = 4.69 \cdot 10^8 \text{ Pa}$$

$$S_{ut_biela} = 6.802 \cdot 10^4 \cdot \text{psi}$$

$$a_{\text{Neuber}} := 0.093^2 \text{ in}$$

$$q_{biela} := \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{a_{\text{Neuber}}}}{\sqrt{d_{\text{ext_buj e}}}}}$$

$$q_{biela} = 0.865$$

$$k_{f_biela} := 1 + q_{biela} \cdot (k_{t_biela} - 1)$$

$$k_{f_biela} = 1.263$$

Los componentes alternantes y medios de la fuerza son:

$$F_{\max_biela} := 20 \text{ N}$$

$$F_{\min_biela} := 5 \text{ N}$$

Peso pierna y actuador

$$F_{a_biela} := \frac{F_{\max_biela} - F_{\min_biela}}{2}$$

$$F_{a_biela} = 7.5 \text{ N}$$

$$F_{m_biela} := \frac{F_{\max_biela} + F_{\min_biela}}{2}$$

$$F_{m_{biela}} = 12.5 \text{ N}$$

Para momento y par de torsión

$$M_{a_{biela}} := F_{a_{biela}} \cdot L_{biela}$$

$$M_{a_{biela}} = 0.862 \text{ J}$$

$$M_{m_{biela}} := F_{m_{biela}} \cdot L_{biela}$$

$$M_{m_{biela}} = 1.437 \text{ J}$$

$$d_{cm_{biela}} := 0.15 \text{ m}$$

Distancia de la biela al centro de masa del robot.

$$T_{a_{biela}} := F_{a_{biela}} \cdot d_{cm_{biela}}$$

$$T_{a_{biela}} = 1.125 \text{ J}$$

$$T_{m_{biela}} := F_{m_{biela}} \cdot d_{cm_{biela}}$$

$$T_{m_{biela}} = 1.875 \text{ J}$$

Calculo de las componentes alternantes de los esfuerzos

$$I_{biela} := \frac{H_{biela} \cdot W_{biela}^3}{12}$$

$$I_{biela} = 1.125 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4$$

$$c_{biela} := \frac{W_{biela}}{2}$$

$$c_{biela} = 7.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\sigma_{a_{biela}} := k_{f_{biela}} \cdot \frac{M_{a_{biela}} \cdot c_{biela}}{I_{biela}}$$

$$\sigma_{a_{biela}} = 7.261 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{m_{biela}} := \frac{M_{m_{biela}} \cdot c_{biela}}{I_{biela}}$$

$$\sigma_{\text{biela}} = 9.583 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

Para el calculo del esfuerzo cortante torsional máximo, se deben definir unas constantes propias de la barra, debido a su sección no circular.

$$KJ_{\text{biela}} := W_{\text{biela}} \cdot H_{\text{biela}}^3 \cdot \left[\frac{1}{3} - 0.21 \cdot \frac{H_{\text{biela}}}{W_{\text{biela}}} \cdot \left[1 - \frac{\left(\frac{H_{\text{biela}}}{W_{\text{biela}}} \right)^4}{12} \right] \right]$$

$$KJ_{\text{biela}} = 2.663 \cdot 10^{-10} \text{ m}^4$$

$$Q_{\text{biela}} := \frac{W_{\text{biela}} \cdot H_{\text{biela}}^2}{3 + 1.8 \cdot \frac{H_{\text{biela}}}{W_{\text{biela}}}}$$

$$Q_{\text{biela}} = 6.897 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3$$

$$\tau_{\text{a biela}} := \frac{T_{\text{a biela}}}{Q_{\text{biela}}}$$

$$\tau_{\text{a biela}} = 1.631 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$

Se modifican los factores de concentración para esfuerzos medios dependiendo del limite elástico del material.

$$S_{y_{ac}} := 2.07 \cdot 10^8 \text{ Pa}$$

$$M_{\text{max biela}} := F_{\text{max biela}} \cdot L_{\text{biela}}$$

$$\sigma_{\text{max biela}} := \frac{M_{\text{max biela}} \cdot c_{\text{biela}}}{I_{\text{biela}}}$$

$$k_{f_{\text{biela}}} := \begin{cases} k_{f_{\text{biela}}} & \text{if } \left(k_{f_{\text{biela}}} \cdot \sigma_{\text{max biela}} \right) < S_{y_{al}} \\ \frac{S_{y_{ac}} - k_{f_{\text{biela}}} \cdot \sigma_{\text{a biela}}}{\sigma_{\text{biela}}} & \text{if } k_{f_{\text{biela}}} \cdot \sigma_{\text{max biela}} > S_{y_{al}} \end{cases}$$

$$k_{f_{\text{biela}}} = 1.263$$

Puede observarse que los factores no se modificaron

$$\sigma_{mc_biela} := k_{fm_biela} \cdot \frac{M_{m_biela} \cdot c_{biela}}{I_{biela}}$$

$$\sigma_{mc_biela} = 1.21 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$

$$\tau_{mc_biela} := \frac{T_{m_biela}}{Q_{biela}}$$

$$\tau_{mc_biela} = 2.719 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$

Se calcula el SEQA que es un esfuerzo equivalente, una técnica similar a la de Von Mises, pero esta tiene en cuenta la fase entre los esfuerzos, lo que da origen generalmente a diseños menos conservadores (alrededor del 70% para 90°).

$$Q_{a_re_biela} := 2 \cdot \frac{\tau_{a_biela}}{\sigma_{a_biela}}$$

$$SEQA_a := \frac{\sigma_{a_biela}}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{1 + \frac{3}{4} \cdot Q_{a_re_biela}^2 \cdot \cos\left(2 \cdot \frac{\pi}{2}\right) + \frac{9}{16} \cdot Q_{a_re_biela}^4}$$

$$SEQA_a = 7.53 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$

$$Q_{m_re_biela} := 2 \cdot \frac{\tau_{m_biela}}{\sigma_{m_biela}}$$

$$SEQA_m := \frac{\sigma_{m_biela}}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{1 + \frac{3}{4} \cdot Q_{m_re_biela}^2 \cdot \cos\left(2 \cdot \frac{\pi}{2}\right) + \frac{9}{16} \cdot Q_{m_re_biela}^4}$$

$$SEQA_m = 1.603 \cdot 10^8 \text{ Pa}$$

Para el calculo del factor de seguridad, debe tenerse en cuenta que los esfuerzos son debidos a la misma causa, el peso del robot y la carga, por tanto un incremento o disminuci3n de esta, tiene un efecto tanto en el valor medio, como en la componente alternante de los esfuerzos, as3 se utiliza la relaci3n constante,

así:

$$F_{s_{biela}} := \frac{S_{f2} \cdot S_{ut_{biela}}}{SEQA_a \cdot S_{ut_{biela}} + SEQA_m \cdot S_{f2}}$$

$$F_{s_{biela}} = 1.048$$

Para el diseño de la biela que se encuentra más distante del apoyo, el proceso se realiza en forma idéntica y arroja los siguientes resultados.

Material Acero 1020, laminado en frío

Espesor 4mm

Factor de seguridad 1.048

Por cuestiones del proceso de manufactura de estos elementos, el corte por láser, se unificaron estas dos clases de piezas, en una pieza de acero 1030 laminado en frío de 3 mm que arroja el mismo factor de seguridad para las bielas que se encuentran más distantes al apoyo, y por tanto es válido para la más cercana, que está sometida a esfuerzos de menor magnitud. Esto debido a que una característica del aluminio (que en nada se relaciona con su resistencia mecánica), el índice de refracción, afecta negativamente a los lentes del láser de la cortadora, y por tanto su fabricación en este material no era conveniente.

4.2.13. Diseño de los ejes

Como se mencionó anteriormente cada pierna es movida por dos bielas que rotan sincronizadas, para lograr esta sincronía se empleó una correa dentada. Adicionalmente, es necesario sincronizar el movimiento de las dos piernas, con un desfase de 180°, con este fin dos bielas, una de cada pierna, giran solidariamente con un eje, la combinación de estos elementos se denominó eje-bielas trasero, o delantero, según el caso.

Estos ejes estarán sometidos a esfuerzos variantes en el tiempo de torsión y flexión.

$$N_f = 2$$

$$k_{fsm_eje} := 1.15$$

$$k_{fm_eje} := 1.15$$

$$k_{f_eje} := 1.15$$

$$k_{fs_eje} := 1.15$$

$$T_m := \frac{M_{m_biela}}{2}$$

$$T_m = 0.719 \text{ J}$$

$$M_m := T_{m_biela}$$

$$M_m = 1.875 \text{ J}$$

$$T_a := \frac{M_{a_biela}}{2}$$

$$T_a = 0.431 \text{ J}$$

$$M_a := T_{a_biela}$$

$$M_a = 1.125 \text{ J}$$

$$S_{ut_eje} := 1.79 \cdot 10^8 \text{ Pa}$$

$$S_{ut_eje} = 1.79 \cdot 10^8 \text{ Pa}$$

$$S_{f_eje} := \frac{S_{ut_eje}}{3}$$

$$S_{f_eje} = 5.967 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$

$$d_{eje} := \left[\frac{32 \cdot N_f}{\pi} \cdot \left[\frac{\sqrt{(k_{f_eje} \cdot M_a)^2 + \frac{3}{4} \cdot (k_{fs_eje} \cdot T_a)^2}}{S_{f_eje}} + \frac{\sqrt{(k_{fm_eje} \cdot M_m)^2 + \frac{3}{4} \cdot (k_{fsm_eje} \cdot T_m)^2}}{S_{ut_eje}} \right] \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$d_{\text{eje}} = 8.979 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Esta medida puede redondearse a 9 mm, una medida comercial, esta dimensión es válida para el eje que esta sometido a los mayores esfuerzos, por tanto, es válida para los ejes restantes que conforman el cigüeñal, así que todos se fabricaran con esta medida.

4.2.14. Selección de los rodamientos.

Debido a las bajas velocidades de funcionamiento del dispositivo, y a la necesidad de disminuir la fricción los rodamientos se imponen ante los bujes como la alternativa más lógica.

Por su bajo costo, y su alta resistencia a cargas radiales los rodamientos rígidos de bolas son los más populares actualmente, y los más adecuados para este diseño en particular.

Al revisar cualquiera de los catálogos de rodamientos comerciales, puede observarse que incluso el rodamiento más pequeño y simple es capaz de soportar cargas de varias decenas de kilogramos, lo que hace que para este diseño, la carga no sea el factor preponderante para la realización de dicha selección, sólo el diámetro del eje determina el rodamiento que debe elegirse, así como el eje debe tener un diámetro de 9 mm, la rodamiento debe tener este como su diámetro interior, y el exterior debe ser el más pequeño disponible.

El rodamiento seleccionado es 618ZZ, y sus características son:

Diámetro interior: 9 mm.

Diámetro exterior: 17 mm.

Ancho: 5 mm.

La designación final ZZ se refiere a que es prelubricada y doblemente sellada, una característica muy útil, para garantizar la ausencia de partículas contaminantes, y disminuir el mantenimiento necesario.

4.3. ACERCA DE LA ESTRUCTURA.

La estructura fue diseñada como una estructura estática, que fuera capaz de sostenerse, en cualquiera de la posiciones que adoptará, sin embargo, cada uno de sus elemento se diseñó para soportar esfuerzos variables en el tiempo que producen fatiga, lo que se muestra en el presente capítulo es el esfuerzo por diseñar una estructura con la rigidez necesaria para soportar este tipo de esfuerzos a lo largo de 20 años, pero a la vez de minimizar el peso, mediante una correcta aplicación de las técnicas de diseño mecánico.

4.4. ACTUADORES.

4.4.1. Motor principal

Motor responsable del avance del robot, para seleccionarlo es necesario analizar el torque requerido en cada instante del ciclo de marcha (un paso), el paso se divide en dos momentos, el primero lleva la pierna hacia adelante una longitud L_{biela} , determinada por la biela que transmite la rotación del motor a la pierna; el segundo momento, lleva el cuerpo del robot hacia adelante una longitud L_{biela} , es decir, cada paso, es el doble de la longitud de la biela, si:

$$L_{biela} := 10 \text{ cm}$$

$$L_{paso} := 2 \cdot L_{biela}$$

$$L_{paso} = 0.2 \text{ m}$$

El peso de la pierna se supone a partir, de las dimensiones deseadas, y una densidad lineal supuesta para un perfil, esta deberá derivarse de cálculos de estructura que se harán mas adelante:

$$\text{altura} := 64 \text{ cm}$$

$$L_{\text{pie}} := 50 \text{ cm}$$

$$A_{\text{pie}} := 22 \text{ cm}$$

$$\mu L := 0.34 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

$$P_{\text{pierna}} := \mu L \cdot g \cdot (L_{\text{pie}} + 2 \cdot A_{\text{pie}} + \text{altura})$$

$$P_{\text{pierna}} = 5.268 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$$

El peso total del cuerpo del robot, es quizá la suposición mas difícil, contemplando ciertos requerimientos como el soporte, el motor principal, ciertos eléctricos (inteligencia abordo), la batería (autonomía energética), y la carga útil, que es la principal ventaja sobre otros diseños de robots bípedo, con esto en mente se estima:

$$P_{\text{total}} := 8 \text{ kgf}$$

Durante el primer momento, el torque requerido para el movimiento esta dado por:

$$\theta := 0$$

Condición critica

$$\text{Torque1} := L_{\text{biela}} \cdot P_{\text{pierna}} \cdot \cos(\theta \cdot \text{deg})$$

$$\text{Torque1} = 0.527 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$$

Se sabe de antemano que este no es el máximo torque que se exigiría al motor, entonces se calculó para el segundo momento del movimiento:

$$\text{Torque2} := L_{\text{biela}} \cdot (P_{\text{total}} - P_{\text{pierna}}) \cdot \cos(\theta \cdot \text{deg})$$

$$\text{Torque2} = 7.319 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$$

Para calcular la potencia que el motor debe poseer se supondrá, que el robot daría un paso cada cierto tiempo:

$$T_{\text{paso}} := 2 \text{ s}$$

El motor al mover ambas piernas debería tener el doble de la velocidad angular de las bielas:

$$\omega_{\text{motor}} := \frac{2 \cdot \pi}{T_{\text{paso}}}$$

$$\omega_{\text{motor}} = 3.142 \text{ s}^{-1}$$

Si la potencia del motor se calcula:

$$Pot := \text{Torque2} \cdot \omega_{\text{motor}}$$

$$Pot = 22.992 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$$

En un motor de 12 voltios esto representa:

$$\text{Corriente} := \frac{Pot}{12 \text{ V}}$$

$$\text{Corriente} = 1.916 \text{ A}$$

Estos datos hacen evidente que el motor adecuado para esta aplicación debe poseer un mecanismo reductor, de preferencia del tipo sinfin-corona, u otro que posea un torque de retención relativamente elevado, para mantener la precisión y disminuir los costos se consideró conveniente que este mecanismo estuviera incorporado al motor desde su fabricación, así conociendo características eléctricas del motor como voltaje y corriente, y la velocidad de salida del reductor se seleccionó un motor diseñado para limpiaparabrisas para camiones.

5. ELECTRÓNICA Y SISTEMAS DE CONTROL

Una de las metas de este trabajo fue mantener en todos los aspectos, el mayor grado de simplicidad que fuera posible, debido a esto la electrónica y la lógica de control, son muy simples, ya que realmente son los elementos mecánicos los que garantiza la estabilidad del robot, haciendo que la electrónica solo sea necesaria para determinar el estado del robot.

5.1. SENSORES

Anteriormente se mencionaba que una de las grandes diferencias entre la robótica de manipuladores y la robótica móvil es la precisión, para un robot manipulador los sensores son uno de los elementos más importantes para determinar su éxito, para un robot móvil los sensores generalmente no determinan posiciones relativas entre sus elementos, sino por el contrario le permiten percibir su entorno, y pueden ser tan simples o tan complejos como se quiera.

Para lograr la marcha los únicos sensores que el robot necesita son dos sensores de contacto situados en las plantas de los pies, estos permiten la realización de una ligera pausa entre paso y paso que garantiza la estabilidad del robot al disminuir las componentes inerciales involucradas en el movimiento.

El medio que el robot posee para relacionarse con el entorno y que no forma parte del objetivo original de las tesis es una cámara de vídeo que mediante un sencillo procesamiento de imágenes, brinda información referente a objetos que se muevan dentro del campo visual del robot, lo cual expande enormemente la posibilidad de realizar trabajos futuros con este, como estimación de distancia a objetos estáticos para evitar colisiones mediante visión estereoscópica.

5.2. LÓGICA DE CONTROL

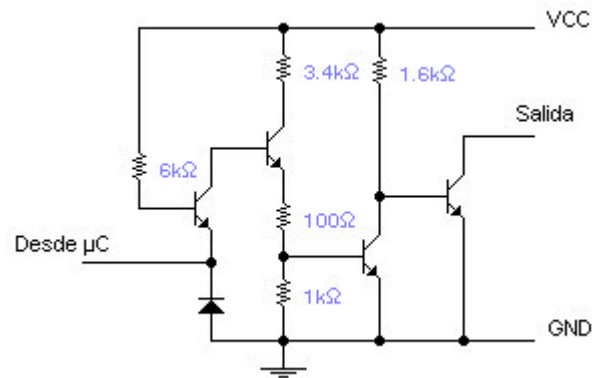
Este robot posee en la actualidad un único grado de libertad, lo cual hace del control una tarea de enorme simplicidad, su lógica esta basada simplemente en aceptar una señal proveniente del sistema de visión artificial que determina si debe o no producirse un movimiento, esperar las señales provenientes de los sensores ubicados en la base de los pies del robot, y realizar la pausa antes mencionada, esta lógica se implementó en un microcontrolador 80C51, dentro del sistema de desarrollo Sisdei 51. (Para más detalles de la lógica implementada en el microcontrolador referirse al anexo P).

La razones para seleccionar un control tipo on-off son varias, la primera, la variable a sensor es la posición angular del eje del motor, este eje no esta limitado de forma alguna para su rotación, es decir, esta variable podría cambiar instantáneamente de su valor máximo a su valor mínimo al completarse una revolución, o podría acumularse tendiendo al infinito, según el sensor usado sea absoluto o incremental, la segunda razón para esta selección, es el hecho de que carece de sentido la implementación de un control más complejo, para un sistema que tan sólo tiene dos puntos de parada, detener el motor en cualquier posición intermedia dejaría al robot apoyado únicamente en una de sus piernas, lo cual esfuerza innecesariamente los elementos mecánicos que lo constituyen e aumenta la posibilidad de que sufra daños por una caída.

Para la implementación de este control se utilizó como etapa de potencia, un seguidor TTL de colector abierto (7417), el cual se encarga de garantizar la corriente necesaria para el funcionamiento de un puente H de Reles, los cuales determinan el sentido de rotación del motor, los reles se seleccionaron debido a la sencillez de su implementación, a su gran robustez, y a su resistencia a los picos de corriente introducidos por un motor de tan alto consumo, adicionalmente existía

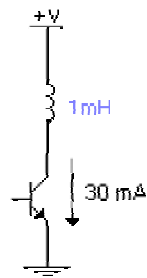
una gran dificultad en realizar una implementación con Mosfet o transistores de potencia, este consiste en el bajo voltaje de alimentación que se ha destinado para el motor que es de tan sólo 6V, la gran mayoría de estos dispositivos de potencia disponibles en el comercio, no admiten voltajes de alimentación tan bajos.

La configuración interna de una de las seis compuertas incluidas en el integrado 7417 es la siguiente:



Esta configuración con múltiples etapas de amplificación ofrece las ventajas propias de la tecnología TTL, como alta impedancia de entrada, compatibilidad con las señales provenientes del microcontrolador, y muy alta velocidad de respuesta, adicionalmente al ser de colector abierto, permite la conexión con dispositivos que exigen voltajes de alimentación tales como las bobinas de los relés.

Esta velocidad de respuesta tan elevada crea un problema a la hora de conectar un elemento de tipo inductivo, así:

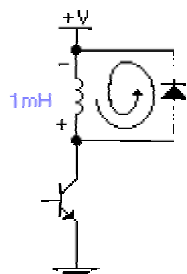


$$v(t) = L \frac{di(t)}{dt}$$

El voltaje en el transistor para este tipo de operación es prácticamente nulo (0.5V), el cual es una característica de operación del transistor. Cuando el transistor pasa repentinamente a un estado de corte, la bobina dada su tendencia a mantener la corriente constante, induce un voltaje que se suma al voltaje de la fuente y resulta muy perjudicial para el transistor de salida (colector abierto), para determinar la magnitud de dicho voltaje se soluciona la ecuación diferencial presentada antes.

$$v(t) = L \frac{di(t)}{dt} = 1 \text{ mH} \cdot \frac{30 \text{ mA} - 0 \text{ mA}}{20 \text{ ns}} = 1500 \text{ V}$$

Este voltaje inducido reduce significativamente la vida útil del elemento, aunque sólo se presente durante intervalos de tiempo muy breves. La solución a este problema es muy simple consiste en la adición de un diodo en paralelo a la bobina, el cual se encarga de permitir a la bobina liberar la energía que ha almacenado como campo magnético de una forma más gradual, evitando este devastador efecto.



La energía almacenada en la bobina es liberada en forma de corriente que se disipa al pasar repetidamente a través del bobinado.

Esto disminuye el tiempo de respuesta, sin embargo, esto no resulta inconveniente debido a que la respuesta de este modelo de rele en particular es del orden de los milisegundos, 10 para cerrar el contacto, y 5 para liberarlo.

6. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE VISIÓN ARTIFICIAL.

En el campo de la robótica una de las consideraciones más importantes que deben hacerse es como se relacionará el robot con su entorno, y para ello, primero debe conocerse como percibirá el robot ese entorno.

Se propone en este caso la introducción de un sencillo sistema de visión artificial, escrito completamente en código Matlab, utilizando el toolbox de procesamiento de imágenes que este incluye.

6.1. CAPTURA DE IMÁGENES DESDE MATLAB.

Para realizar la adquisición de las fotografías que son analizadas en el PC, se utilizó a la librería vfm.dll, de libre distribución, la cual, escrita en código de Visual C++, la cual fue compilada a manera de librería dinámica para facilitar sus utilización desde otros lenguajes de programación.

Esta librería ofrece diversas prestaciones debido a que interactúa en tiempo de ejecución con los drivers que incluye cualquier cámara de vídeo digital para su funcionamiento bajo Windows, así es posible, configurar desde el mismo programa todas los aspectos relevantes para realizar el procesamiento de la imagen, tales como resolución, brillo, cantidad de bits que son utilizados para representar la imagen, intervalos de muestreo, etc.

6.2. DETECCIÓN DE MOVIMIENTO.

En la industria, la utilización de los sistemas de visión artificial (SVA) es cada vez más frecuente, dado su bajo costo, y su increíble versatilidad, sin embargo, aquí el sistema funciona en un ambiente controlado, donde la iluminación es fija, y los

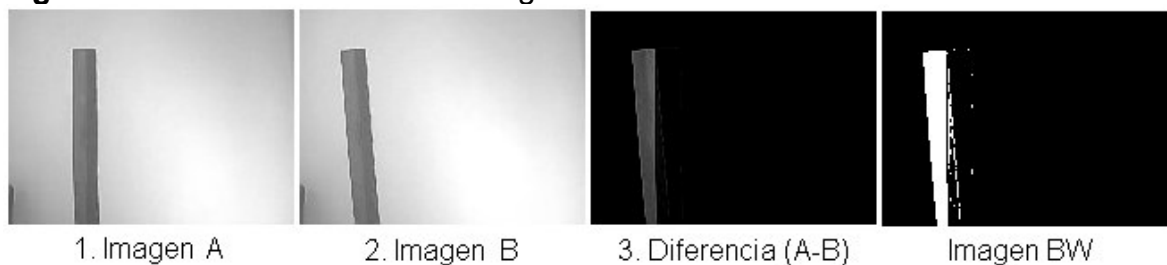
objetos presentes en la imagen son conocidos de antemano por el programador, lo cual, facilita enormemente su diseño, y disminuye las posibilidades de un comportamiento errático del robot. Incluso robots móviles que están siendo desarrollados para interactuar con las personas en un ambiente no controlado, se enfrentan a este tipo de limitaciones, en las pruebas que se realizan al robot desarrollado por la Honda, es posible observar, que la escalera por la cual asciende es de un color claro con un contorno muy oscuro, lo cual brinda un contraste ideal para identificar los bordes de la escalera y hacer más seguro el ascenso del robot, esto no resta de ninguna manera mérito científico a este trabajo en particular, pero sirve aquí como marco para explicar el funcionamiento del SVA para este proyecto.

El principio en el cual se basa este SVA es la detección de movimiento o Tracking, en el cual se realiza la captura de dos imágenes sucesivas en un intervalo de tiempo determinado previamente, las imágenes dentro del código Matlab están representadas por matrices, cuyas dimensiones son el largo y ancho de la imagen capturada, y que puede ser bidimensional para el caso de las imágenes binarias o en escala de grises, o tridimensional en el caso de las imágenes a color o multiespectrales. Para este caso en particular el procesamiento se realizó sobre imágenes en escala de gris, debido a que se utilizan 8 bits para codificar la imagen, cada pixel de la imagen esta representado dentro de la matriz como un número entre 0 y 255, dependiendo de su intensidad.

Después de haber realizado la captura de las dos imágenes sucesivas, se procede a realizar una resta entre la matrices que las representan, así el fondo y los objetos que permanecieron inmóviles aparecerán en la misma posición en ambas fotografías, y al realizar la resta de las matrices desaparecerán, ya que como es evidente la diferencia de dos valores iguales es cero, que representa el negro absoluto.

Por el contrario, los objetos que tuvieron un cambio de posición respecto a la fotografía anterior no desaparecen en la resta de las matrices, sino que por el contrario, obtienen un valor diferente, dependiendo en parte de la distancia recorrida por el objeto.

Figura 33. Procesamiento de la imagen



Con esta nueva imagen, bastante oscura, y un poco confusa, es posible identificar fácilmente que objeto u objetos, realizaron un movimiento durante las exposiciones, para convertir esto en información que pueda ser utilizada por el robot, la nueva imagen es dividida en segmentos en este caso 8 columnas, para cada uno de estos segmentos se realizan las siguientes operaciones, primero se compara cada pixel contra un nivel de gris, conocido en ingles como graythresh, en este caso muy cercano al negro absoluto, para que detecte como blanco cualquier nivel de gris, luego se suman todos los pixeles (ya binarizados), esto determina el tamaño de un objeto difuso que representa el movimiento, y cuya área es una característica dependiente del tamaño del objeto que realizó el movimiento, y de su velocidad, es por esto, que esa suma de pixeles se le conoce como energía del movimiento.

Al obtener el valor de la energía del movimiento para cada segmento, es posible identificar con facilidad en que región se realizó dicho movimiento y generar así un comportamiento que permita al robot interactuar.

7. CONCLUSIONES

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos, y una justificación de porque se piensa que las metas propuestas han sido alcanzadas.

El principal objetivo del proyecto fue cumplido con la construcción de este robot que es capaz de desplazarse de manera autónoma en plano sagital mediante el uso de dos piernas, este objetivo se logró mediante una estrategia de simplificación del problema que se apoya en la mecánica del dispositivo para lograr su estabilidad.

También se cumplió con el objetivo de optimizar el diseño en todos los aspectos, gracias a un planteamiento detallado de los esfuerzos a los que están sometidos los elementos mecánicos, y una búsqueda de la reducción de la cantidad de componentes electrónicos necesarios para cumplir este objetivo.

Adicionalmente, el robot en combinación con el sistema de visión artificial se constituye en una plataforma para futuras investigaciones en los campos de la robótica móvil y el procesamiento de imágenes, campos que actualmente son objeto de innumerables investigaciones en todo el mundo.

FUTURAS MEJORAS.

Se intentó en el transcurso del desarrollo del proyecto realizar una ampliación o mejora de lo que se propuso originalmente, la capacidad del robot de moverse en diferentes direcciones, gracias a unas “rodillas” que permitirían al robot realizar una rotación sobre cualquiera de sus piernas, este movimiento sería realizado por motores localizados en la parte media de las piernas, y que estaban instrumentados mediante encoders incrementales, sin embargo, esto fallo debido a un torque indeseado que se producía durante el momento en que el pie comenzaba a apoyarse en el suelo, esto podría solucionarse mediante la utilización de un motor con un reductor que posea un elevado torque de retención, pero se consideró que era más adecuado tratar de descubrir en futuro las causas de este problema que simplemente ignorarlo.

El sistema de visión artificial programado en Matlab y con comunicación a un microcontrolador, se considera como una poderosa herramienta para investigaciones futuras en el campo del procesamiento de imágenes y la robótica móvil.

BIBLIOGRAFÍA

BEER, Ferdinand & JOHNSTON, Russell. Mecánica vectorial para Ingenieros I, Estática. 6a. ed. Barcelona : McGraw Hill, 1998. 595 p.

BEER, Ferdinand & JOHNSTON, Russell. Mecánica vectorial para Ingenieros II, Dinámica. 6a. ed. Barcelona : McGraw Hill, 1998. 718 p.

HIBBELER, Russell C. Análisis estructural. 3a. ed. México : Prentice Hall, 1996. 616 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Compendio, Tesis y otros trabajos de grado, Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación . Quinta actualización. Santafé de Bogotá D.C. : ICONTEC, 2002. 34 p.

MARTINEZ PEREZ, Javier et al. Practicas con microcontroladores de 8 bits. Madrid : McGraw Hill, 1994. 444 p.

Matlab toolbox pdf, image processing [s.c.] : [s.n.] , [s.f]. 1CD

MERY, Domingo. Visión artificial [En línea]. Departamento de Ingeniería Informática Universidad de Santiago de Chile Santiago de Chile. 2002.
<http://www.diinf.usach.cl/~dmery>

MOTT, Robert L. Resistencia de Materiales Aplicada. 3a. ed. México : Prentice Hall, 1996. 640 p.

NORTON, Robert L. Diseño de Maquinaria. México : Prentice Hall, 1999. 1020 p.

NORTON, Robert L. Diseño de Máquinas. México : Prentice Hall, 1999. 1020 p.

OGATA, Katsuhiko. Ingeniería de Control Moderna. 3a ed. México : Prentice Hall, 1997. 997 p.

PALUSKA, Joseph Daniel, Design of a humanoid biped for walking research, Massachusetts :Massachusetts Institute of Technology, 2000. 54 p.

POPOVICH, Dobrivoje & VLACIC, Ljubo. Mechatronics in Engineering Design and Product Development. Marcel Dekker, Inc. 1999. 610 p.

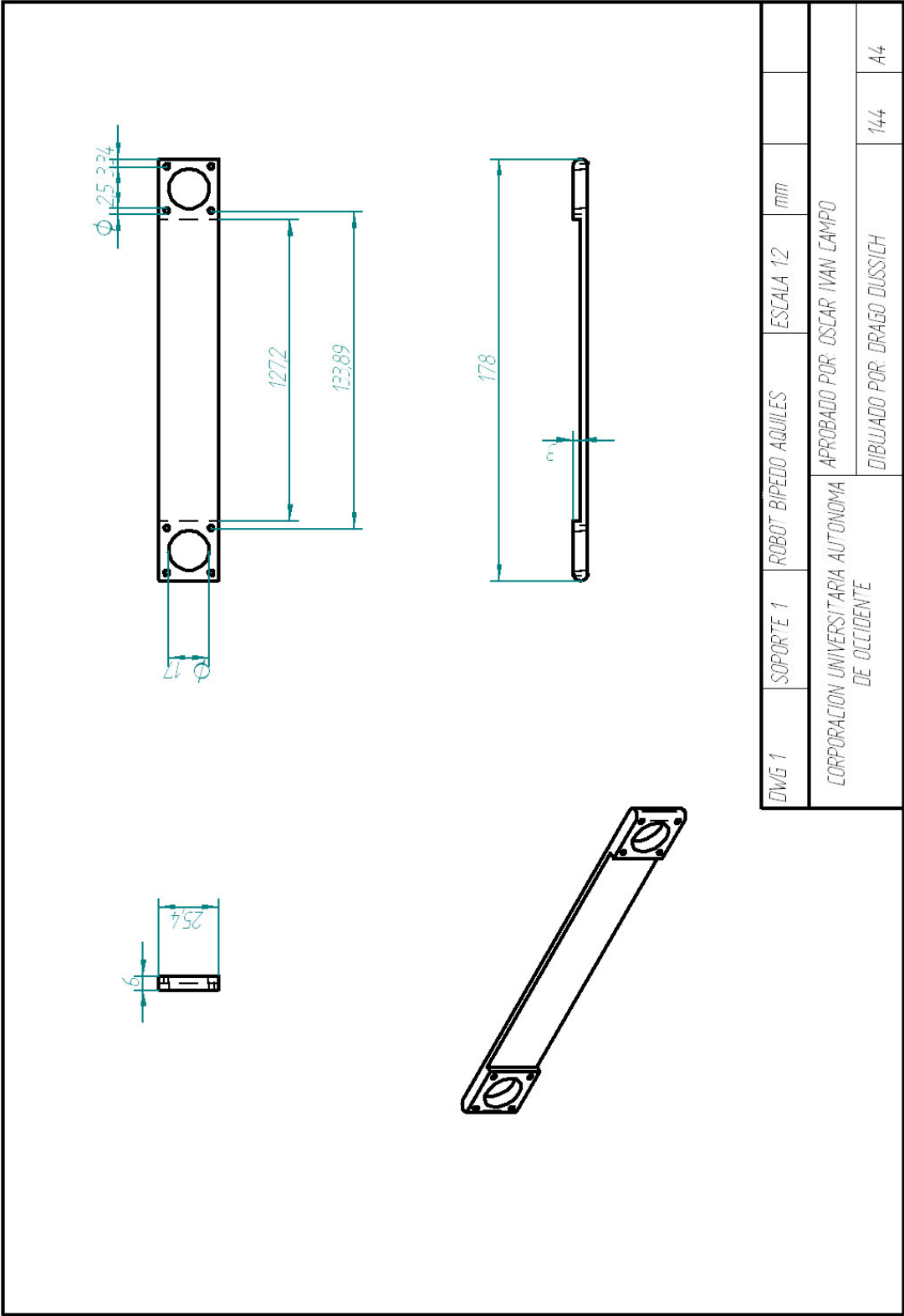
SÁNCHEZ-LACUESTA, Javier et al. Biomecánica de la marcha normal y patológica. Valencia : Instituto de Biomecánica de Valencia. 1998. 422 p.

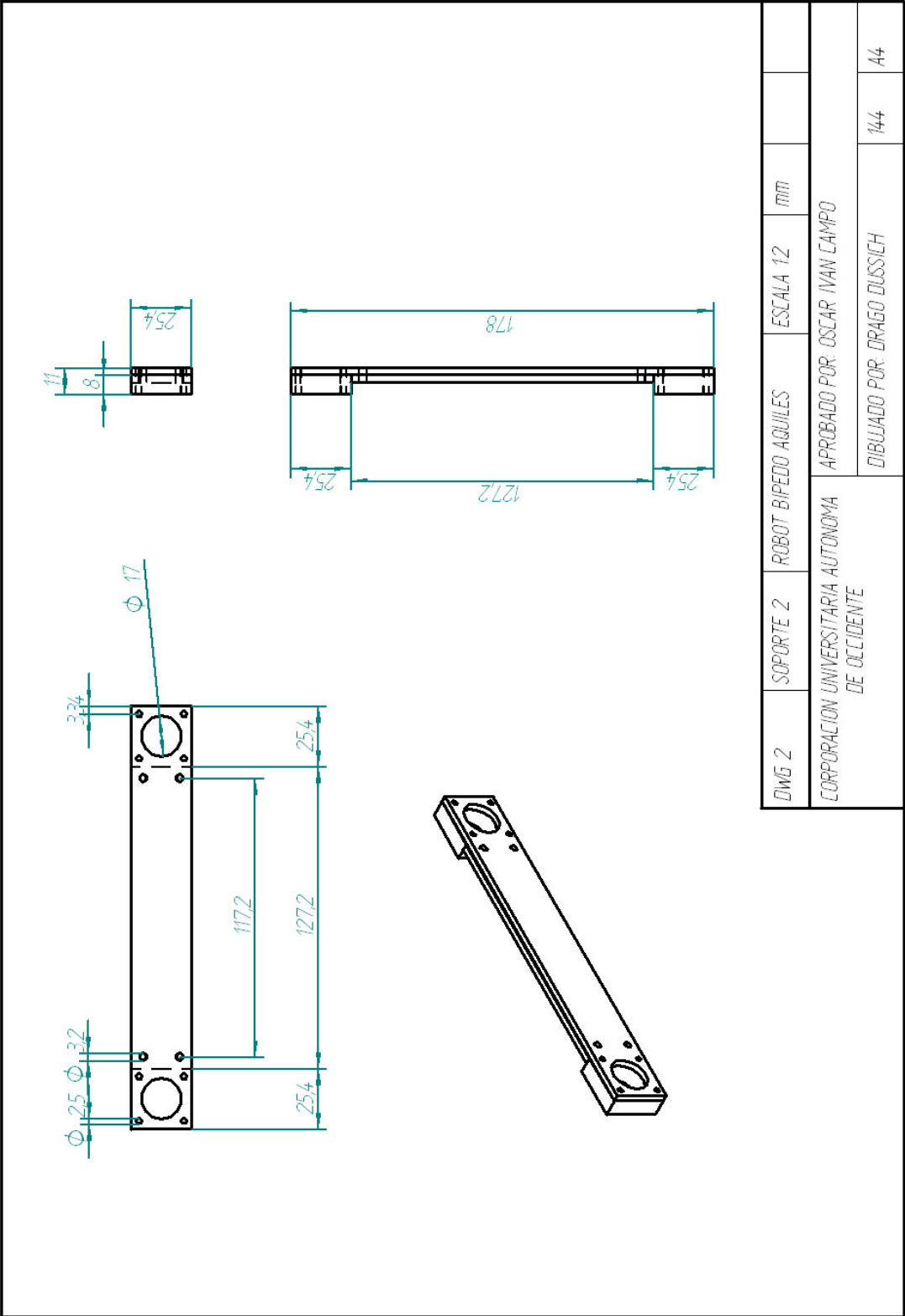
TOCCI, Ronald J. Sistemas digitales, principios y aplicaciones. 6a. ed. México : Prentice Hall. 1995. 832 p.

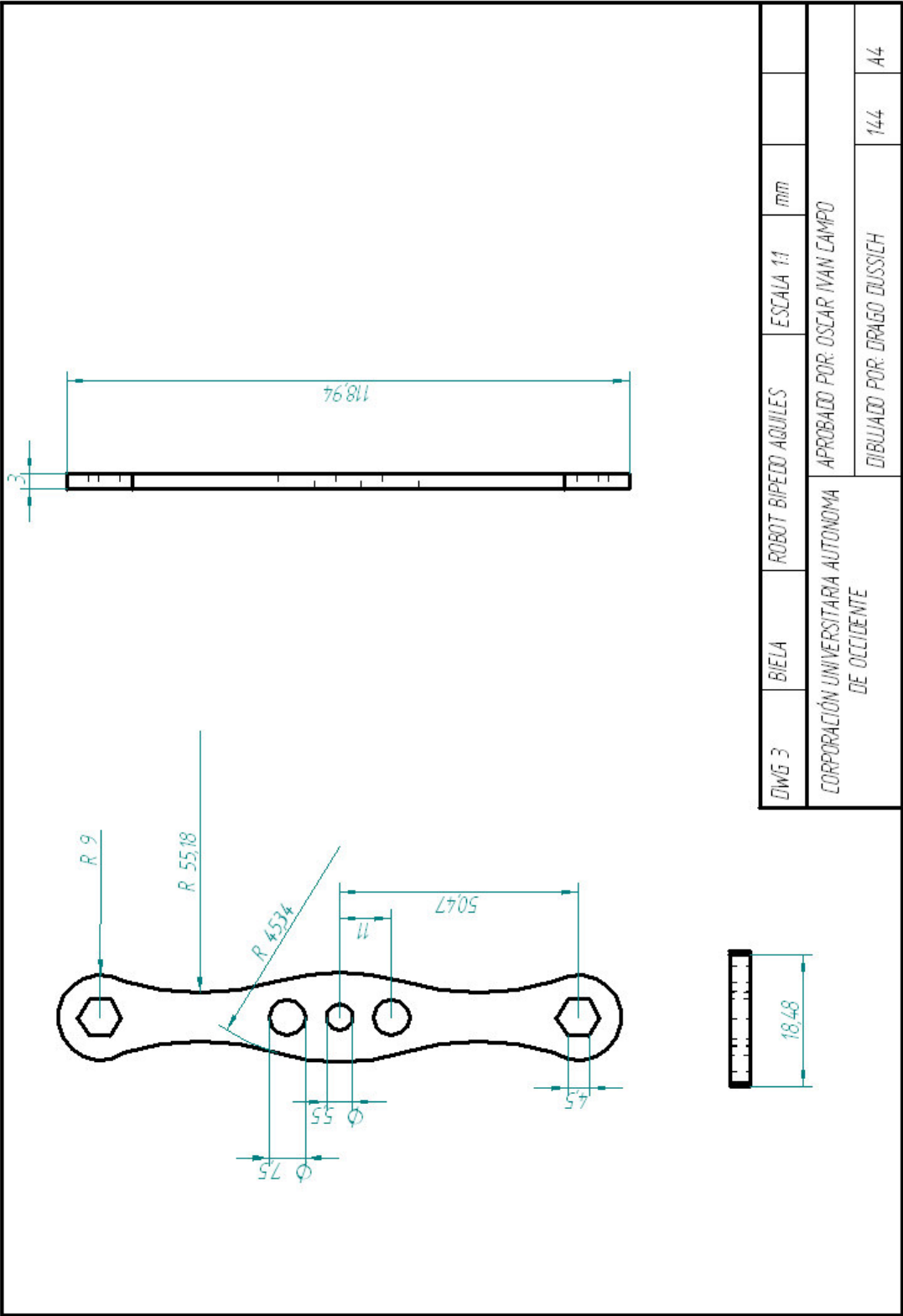
ULRICH, Karl T. & EPPINGER, Steven D. Product Design and Development. 2a. ed. Boston : McGraw Hill. 2000. 351 p.

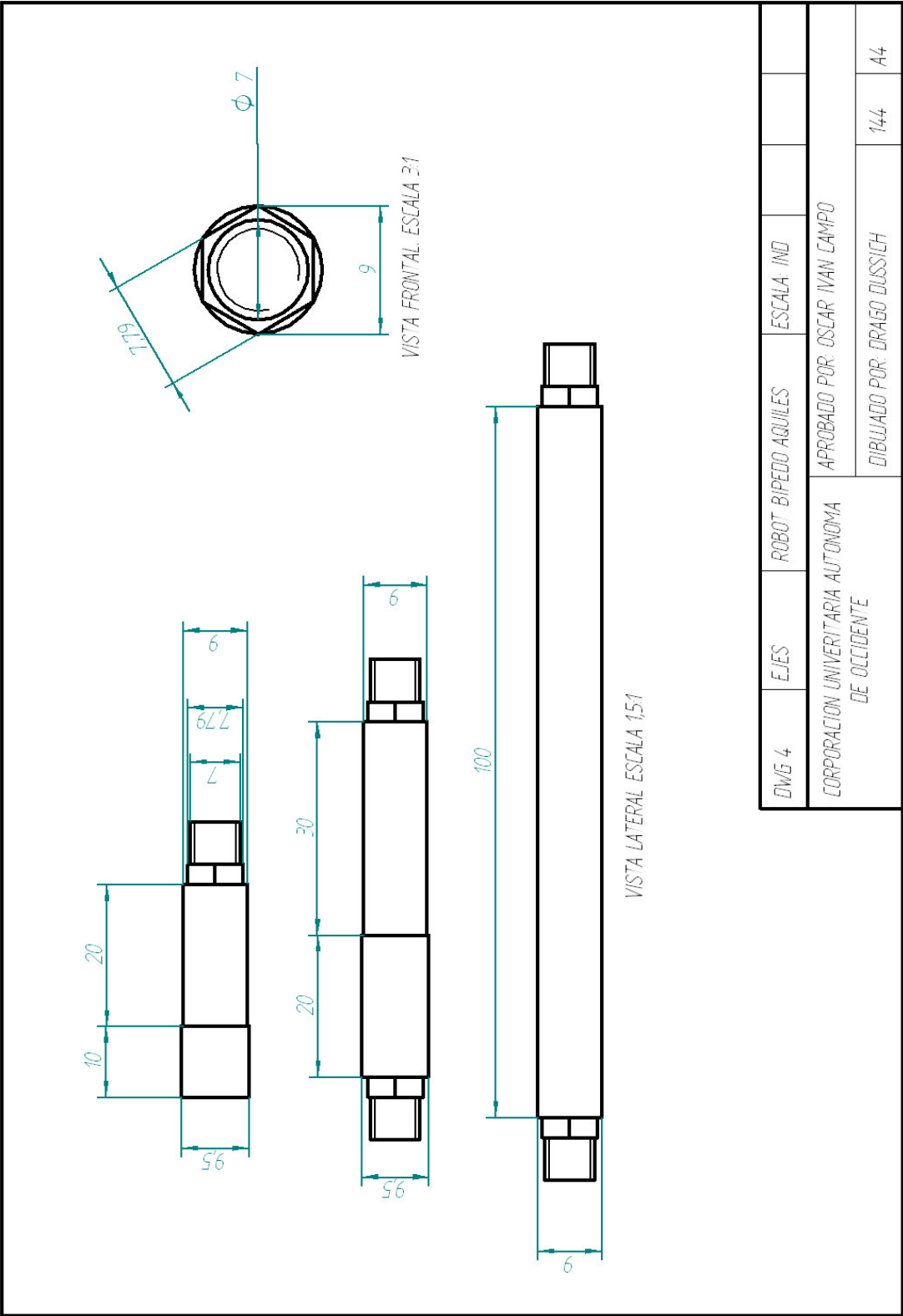
ANEXOS

Anexo	DWG	Nombre
A	1	Soporte simple
B	2	Soporte doble
C	3	Biela
D	4	Ejes
E	5	Cigüeñal
F	6	Cigüeñal (Explosión)
G	7	Polea
H	8	Mecanismo cíclico
I	9	Pie
J	10	Pie (Explosión)
K	11	Pierna
L	12	Pierna (Explosión)
M	13	Ensamble
N	14	Diagrama esquemático Tarjeta Sisdei 51
Ñ	15	Diagrama esquemático del circuito de potencia
O		Análisis de elementos finitos de la biela
P		Diagrama de flujo de los algoritmos de control

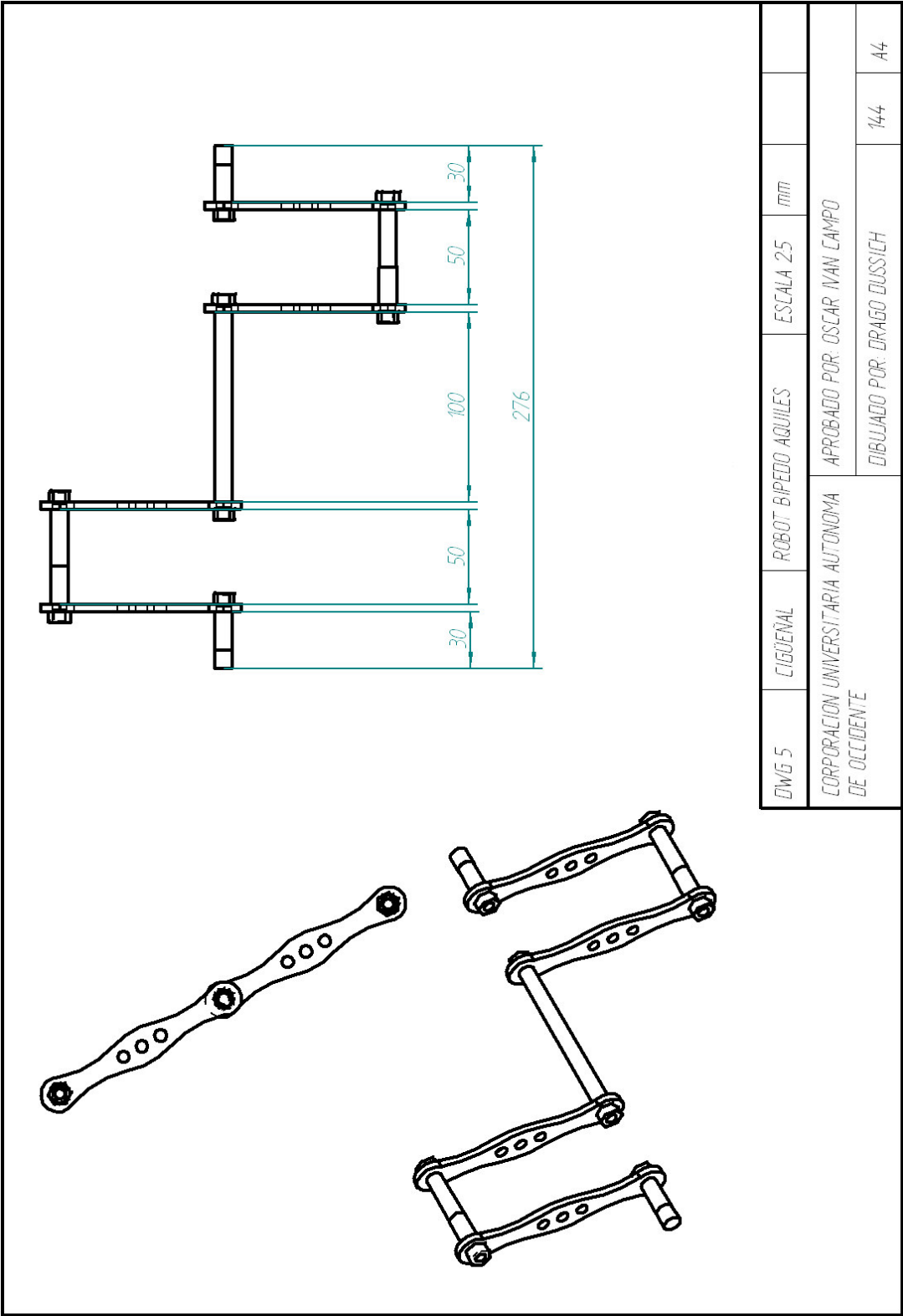


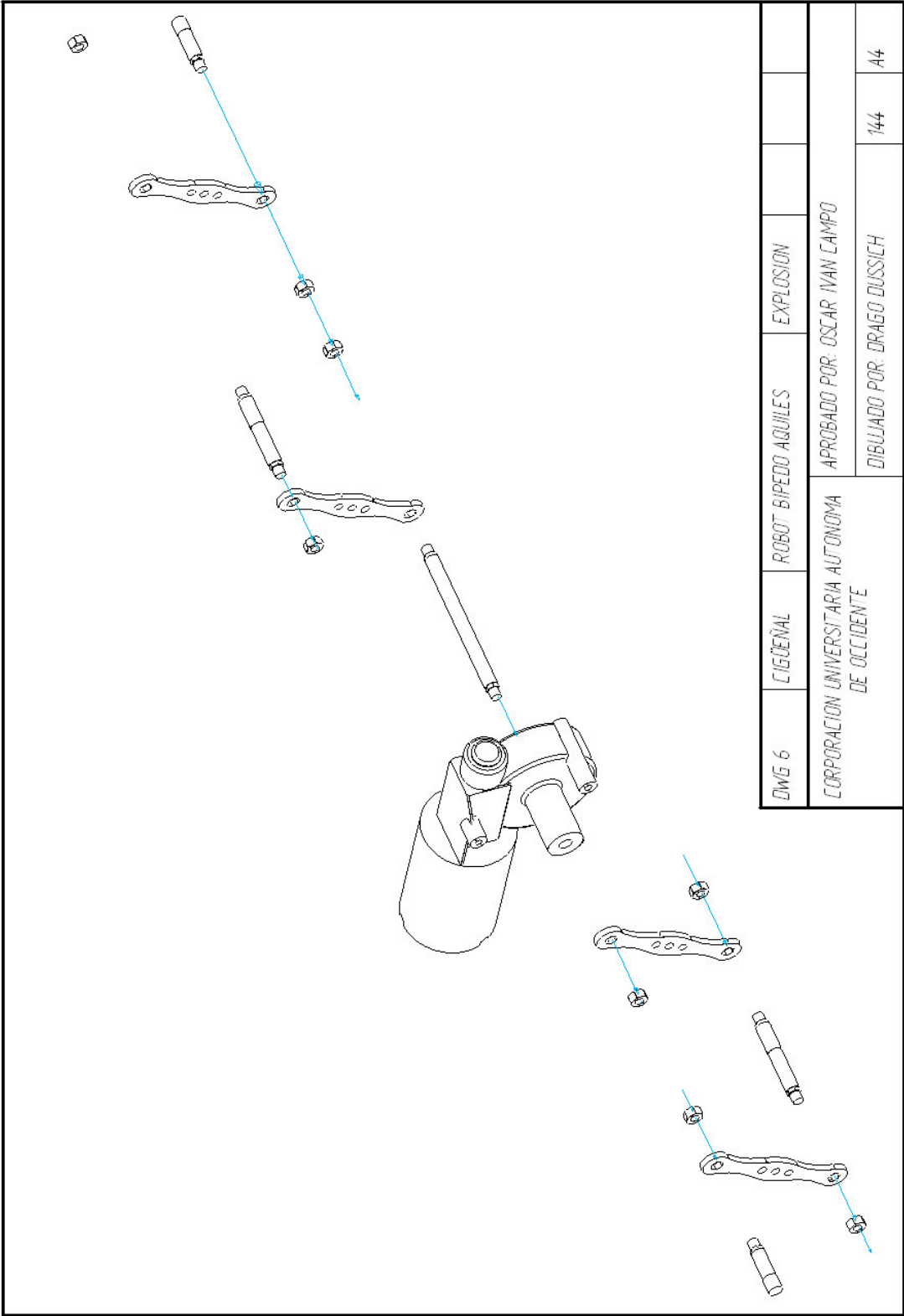


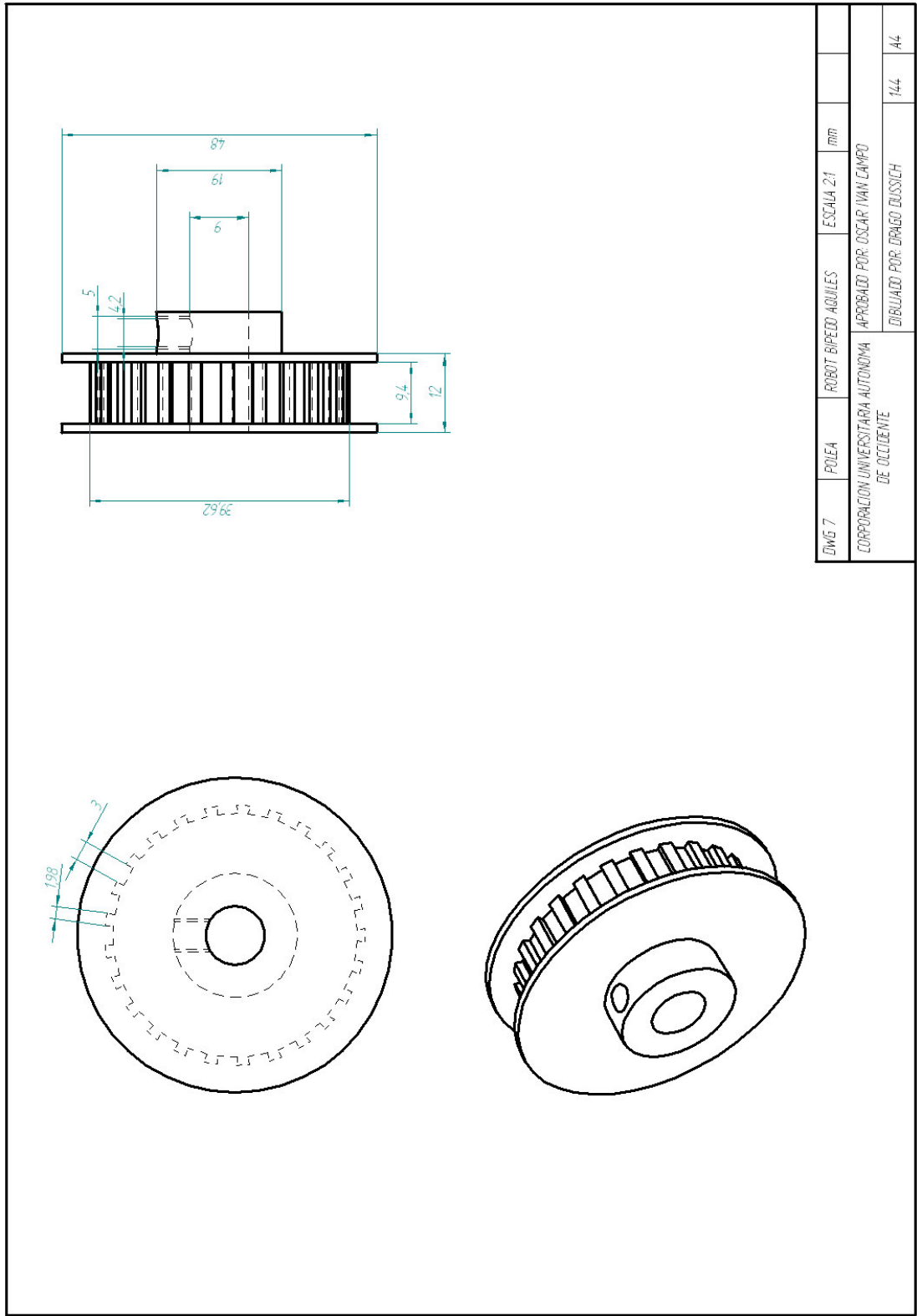


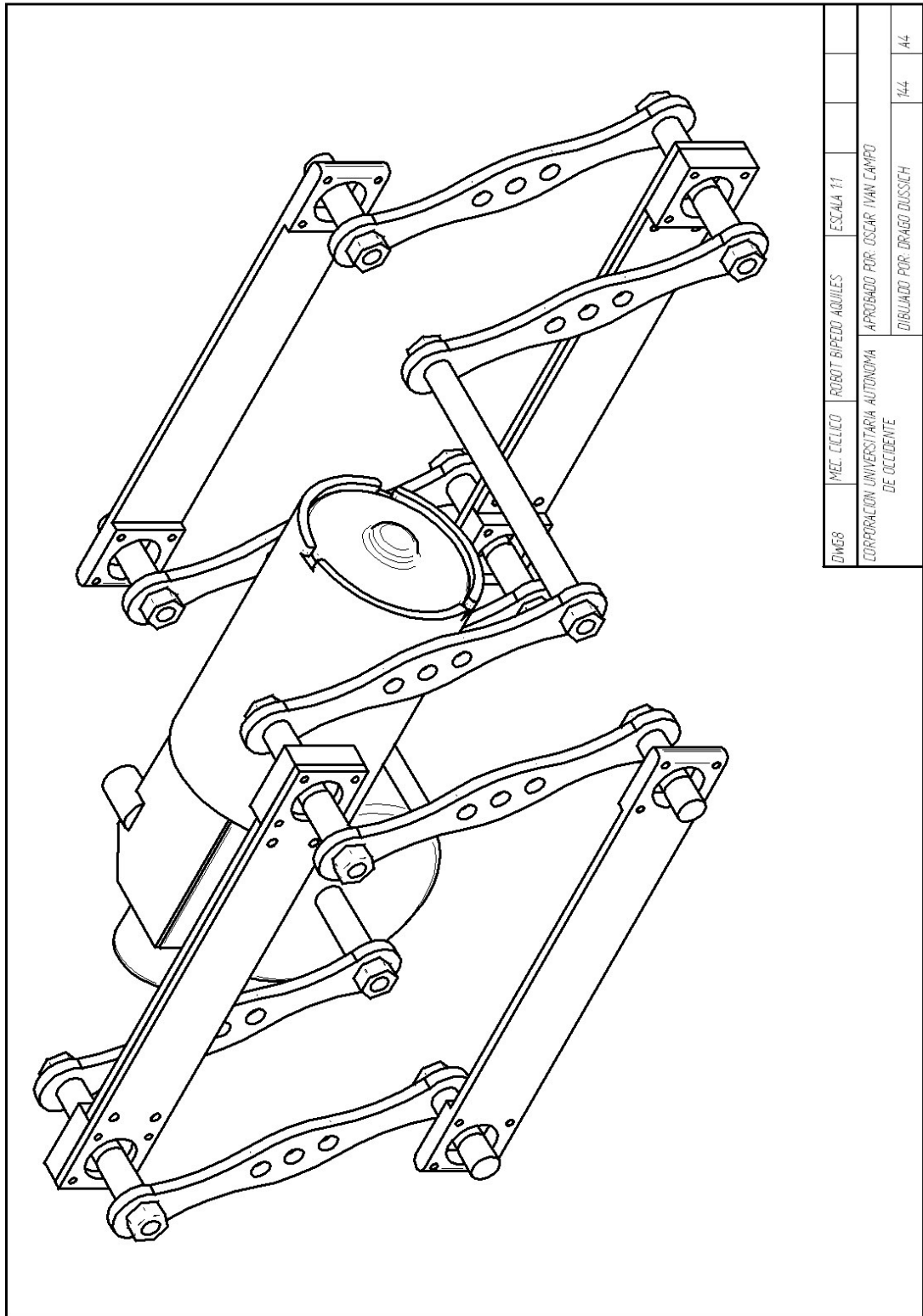


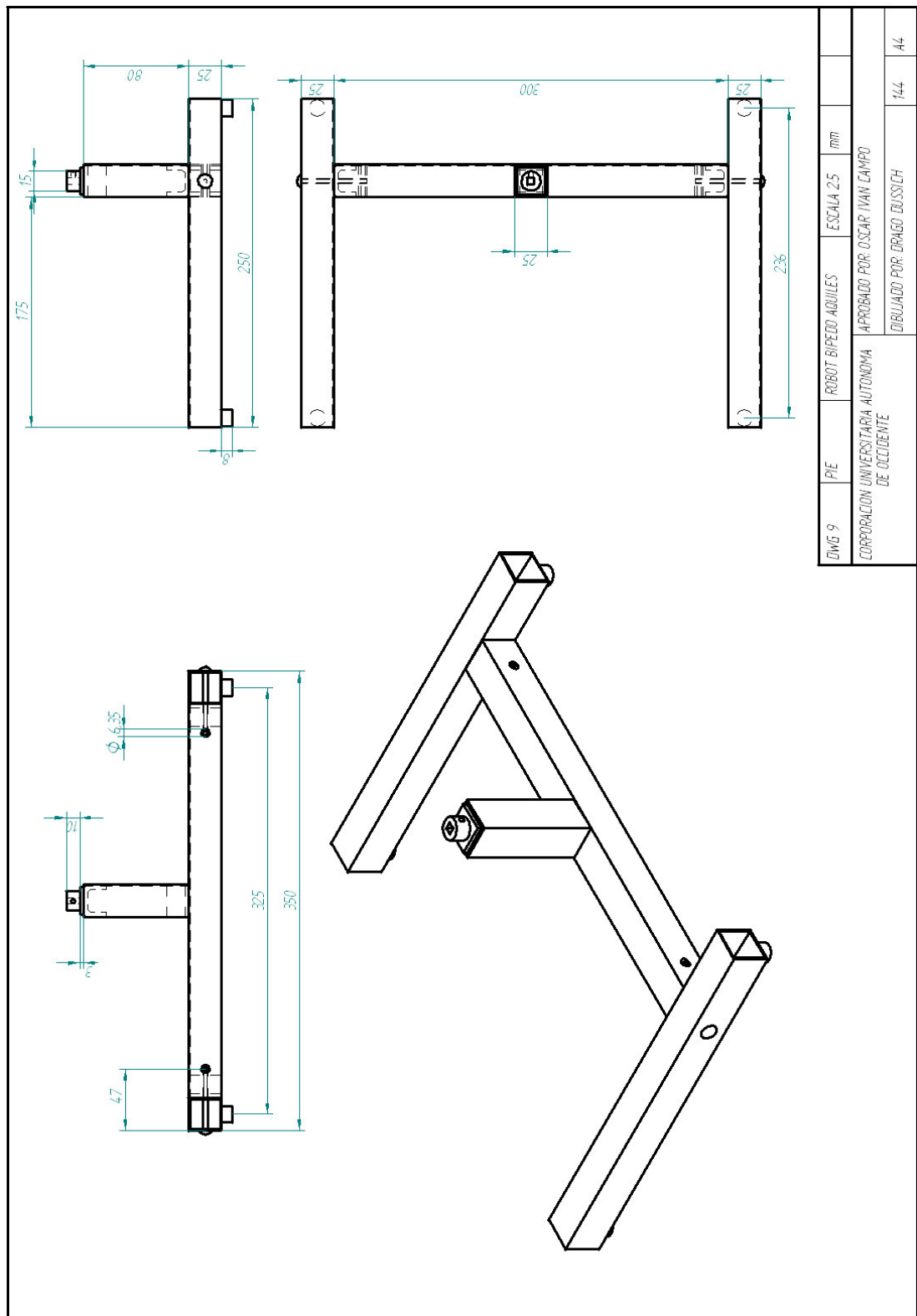
DWG 4	EJES	ROBOT BIPEDO AGUILES	ESCALA: IND		
CORPORACION UNIVERSITARIA AUTONOMA DE OCCIDENTE				APROBADO POR: OSCAR IVAN CAMPO	
				DIBUJADO POR: DRAGO DIUSSICH	144
					A4

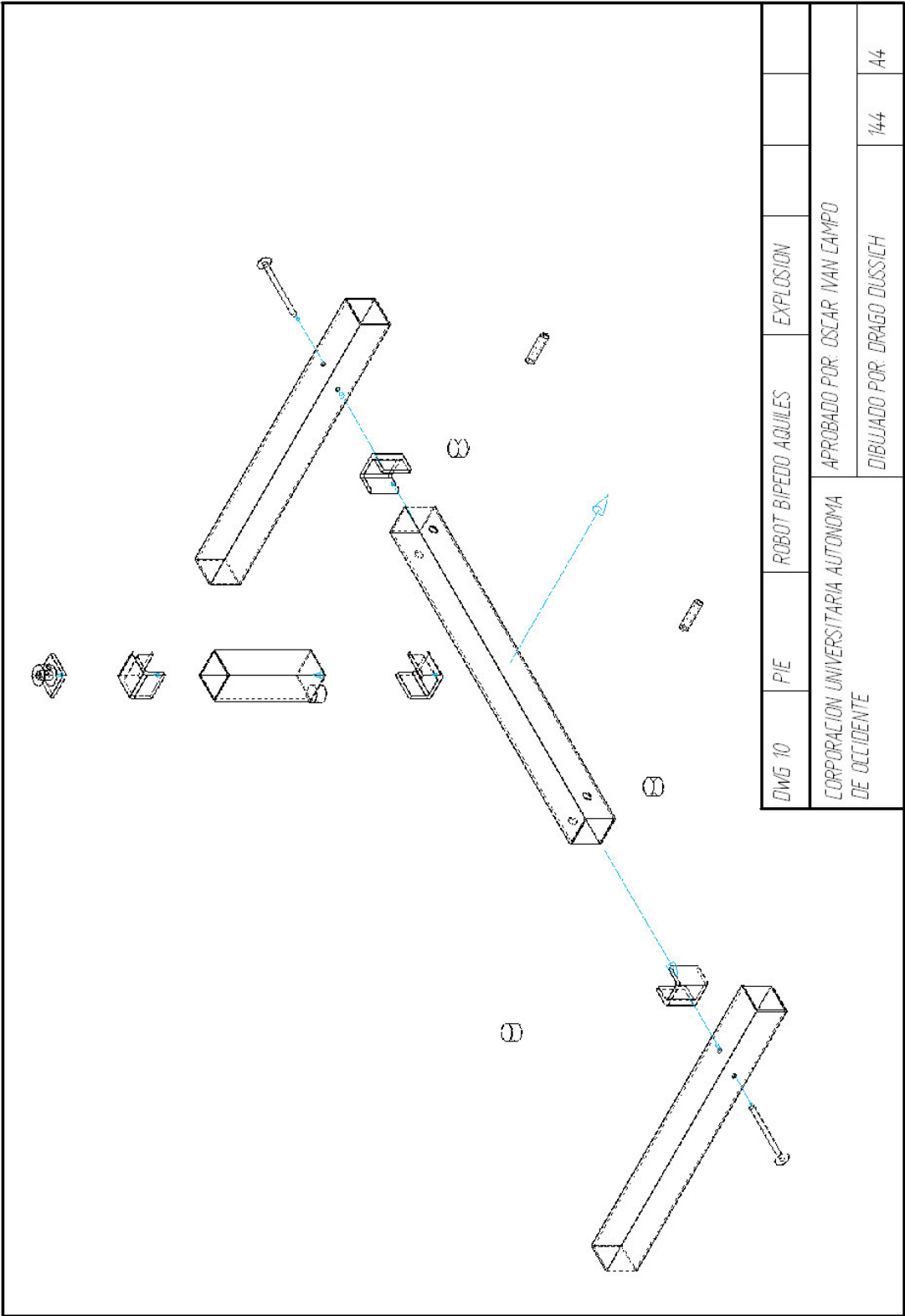


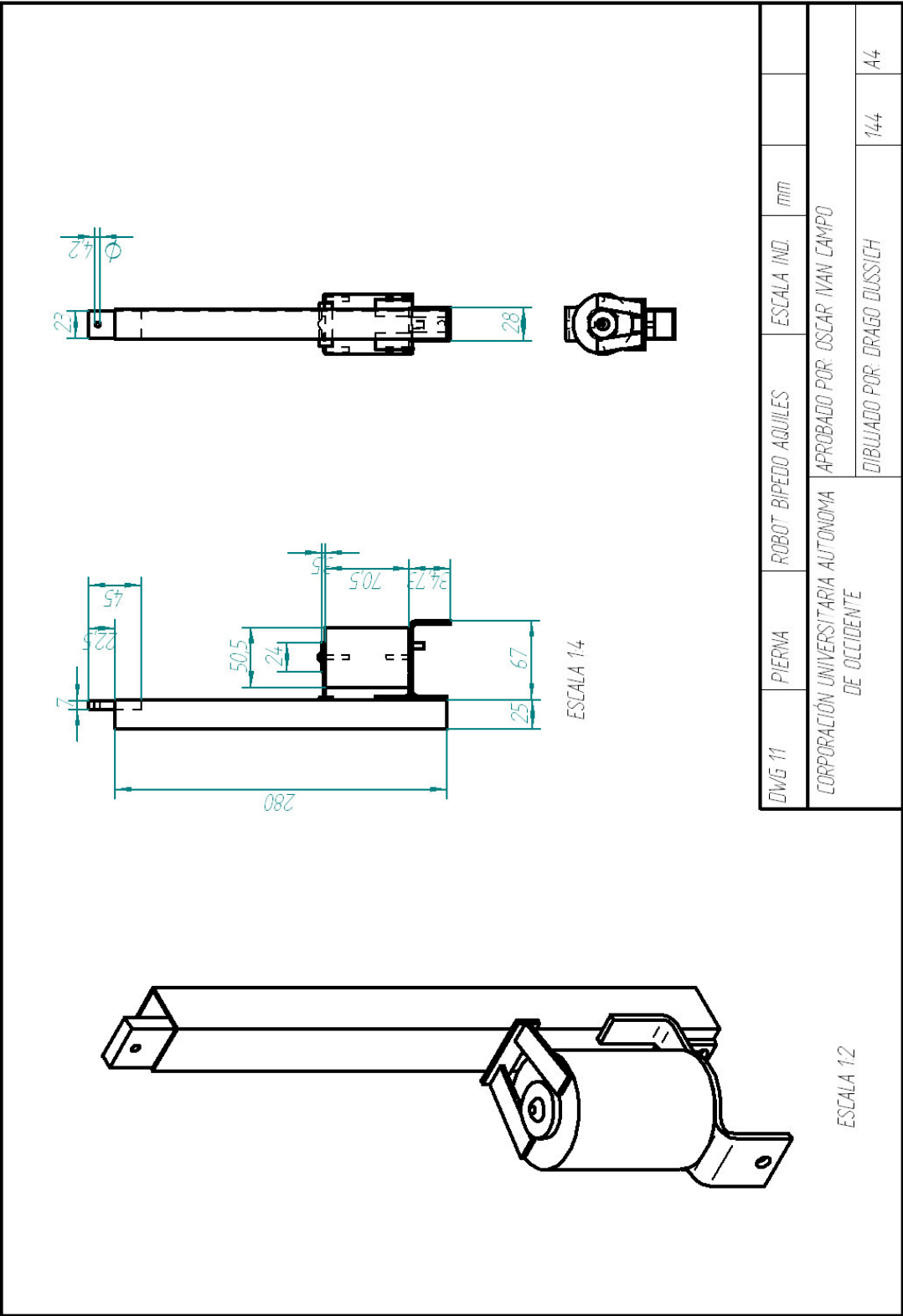




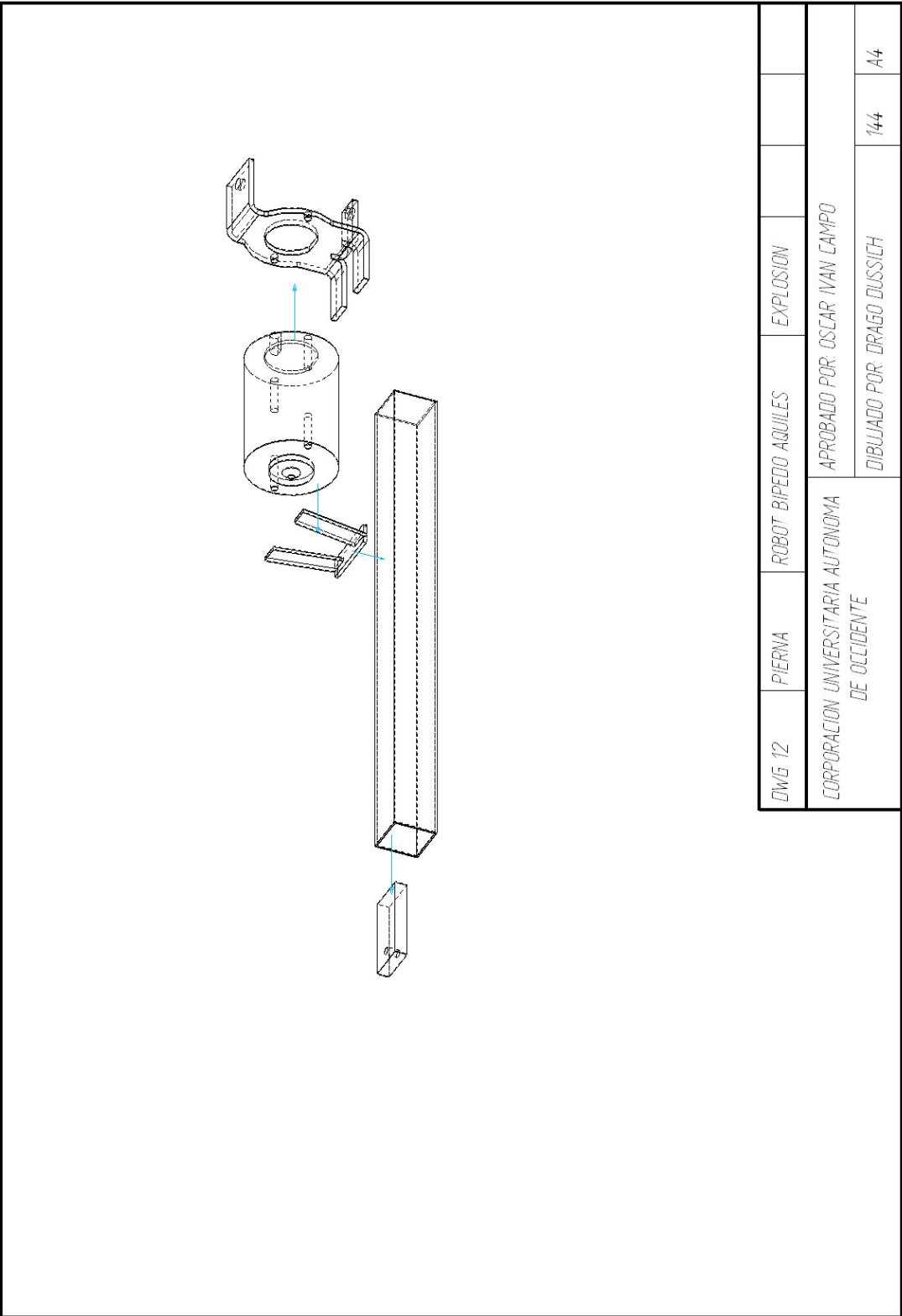


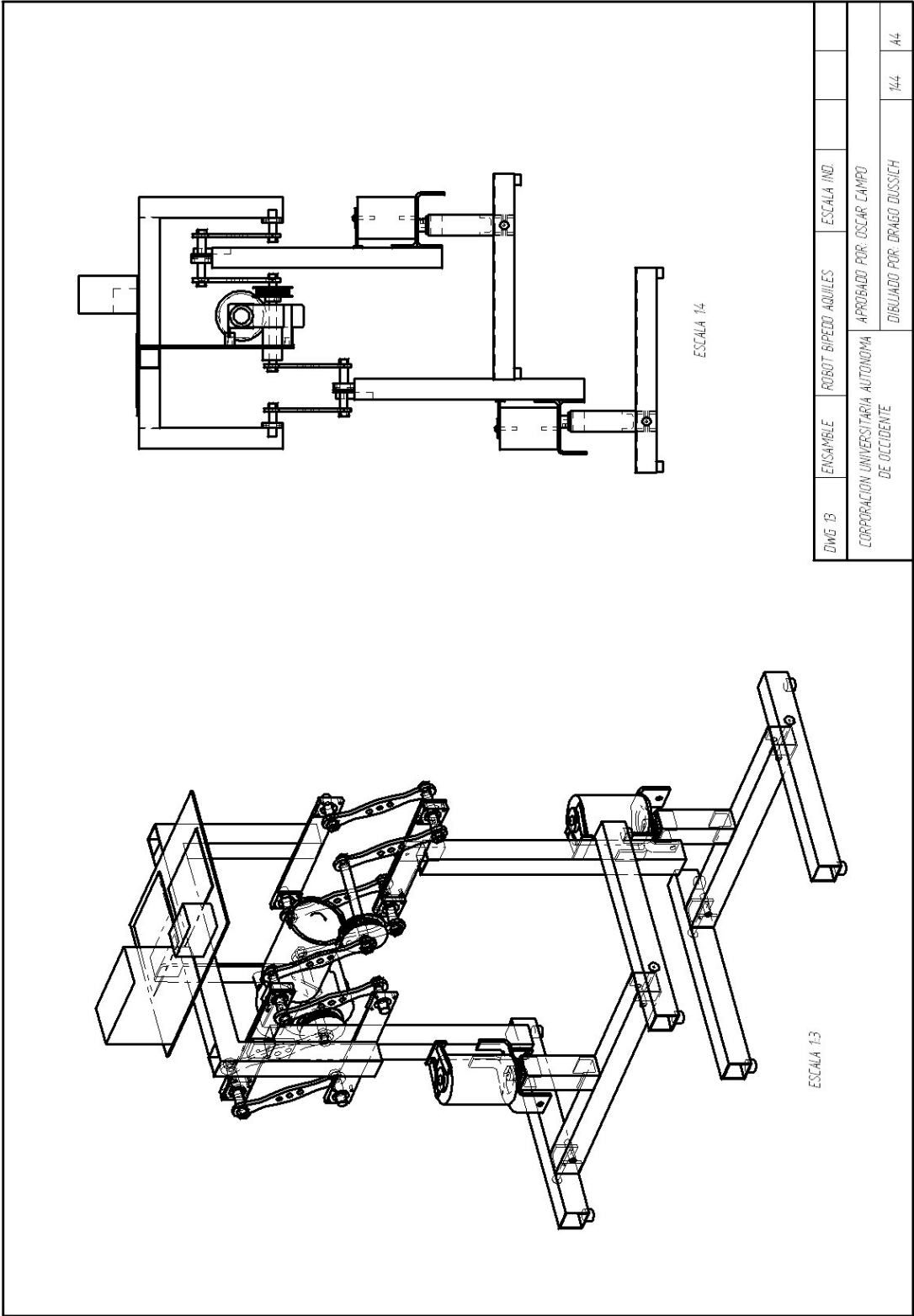




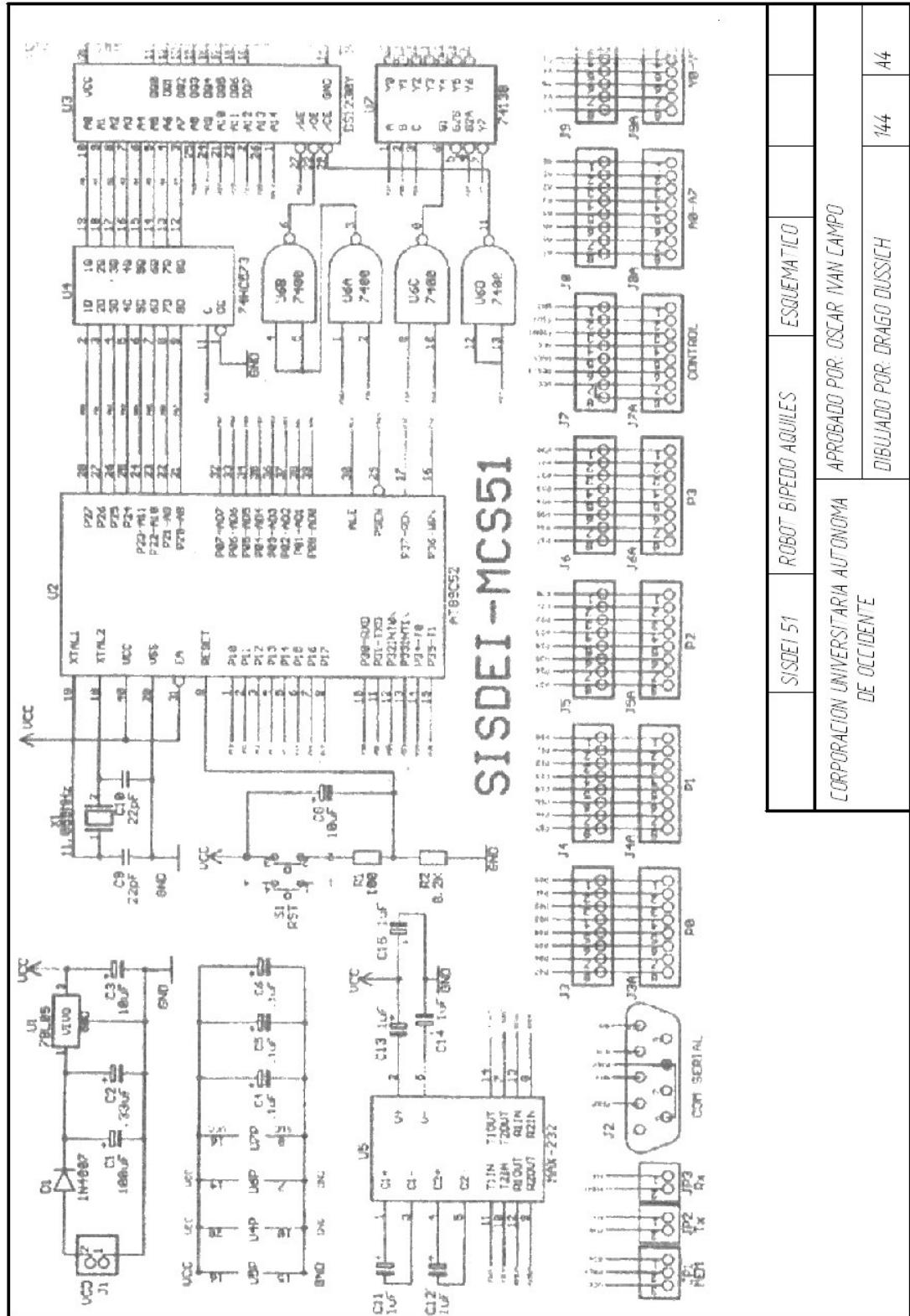


DWG 11	PIERNA	ROBOT BIPEDO AGUILES	ESCALA IND.	mm	
CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DE OCCIDENTE					APROBADO POR: OSCAR IVAN CAMPO
DIBUJADO POR: DRAGO DUSSICH					144
					A4

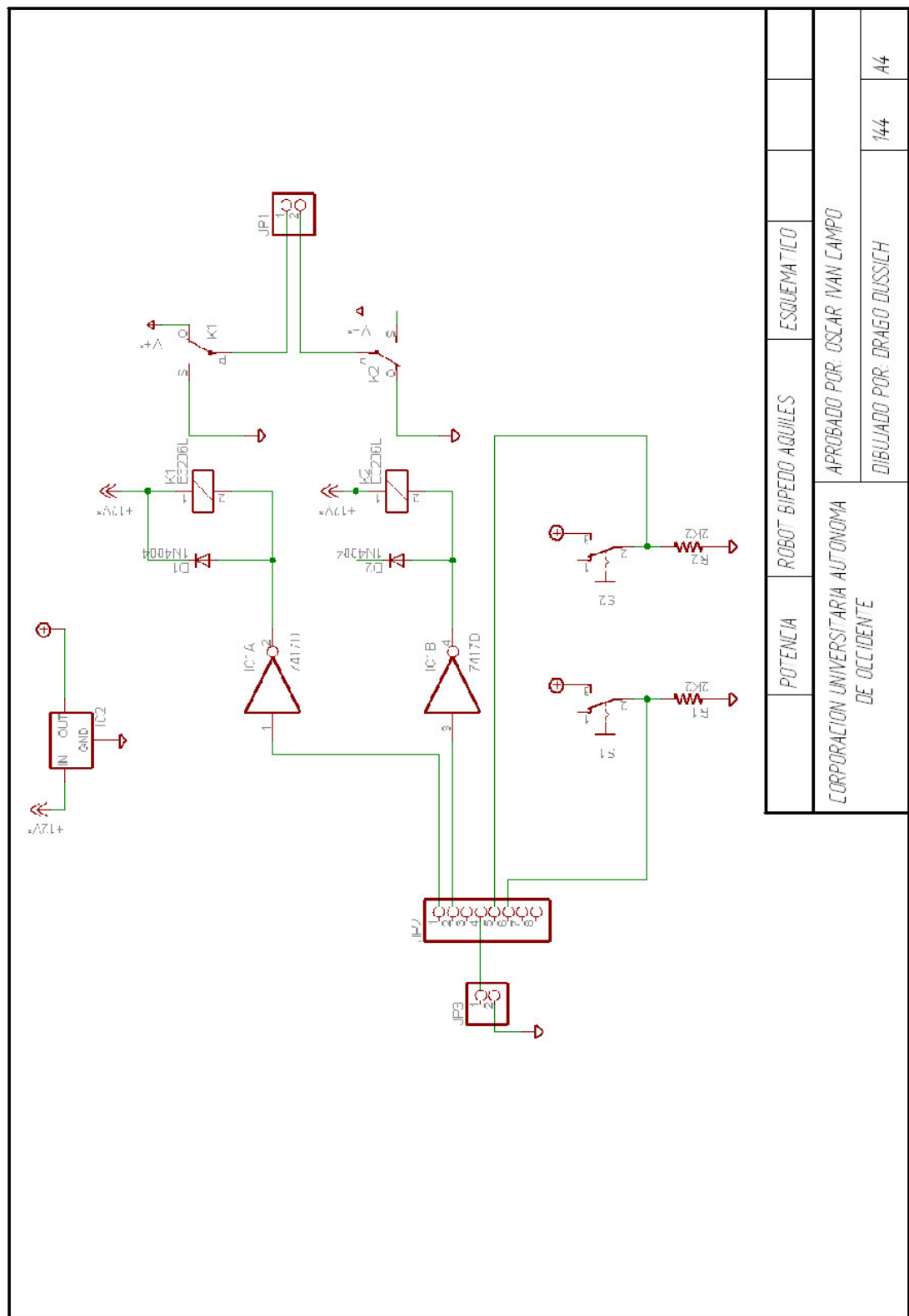




DWG 13	ENSAMBLE	ROBOT BIPEDO AGUILAS	ESCALA IND.		
CORPORACION UNIVERSITARIA AUTONOMA DE OCCIDENTE		APROBADO POR: OSCAR CAMPO		144	A4
		DISEÑADO POR: DRAGO DISSICH			

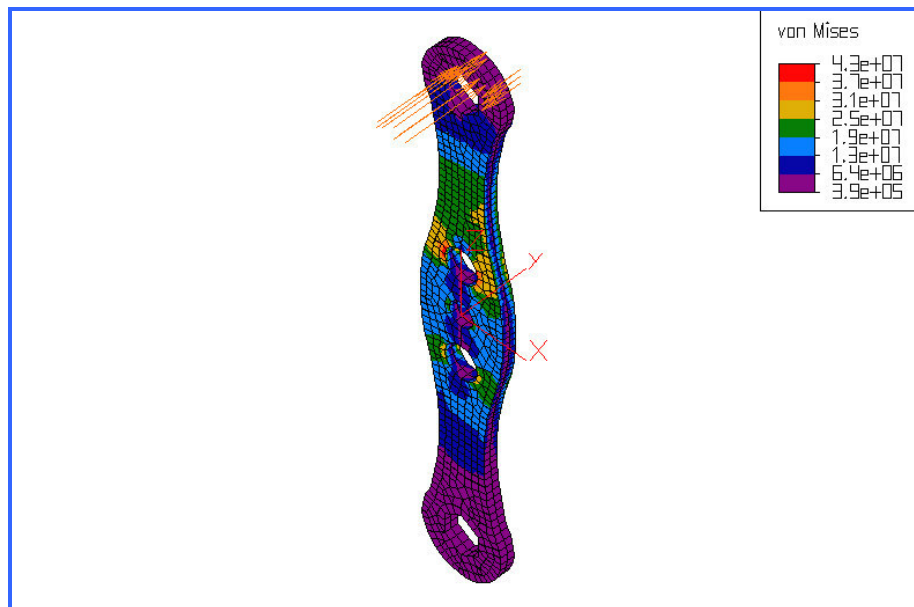
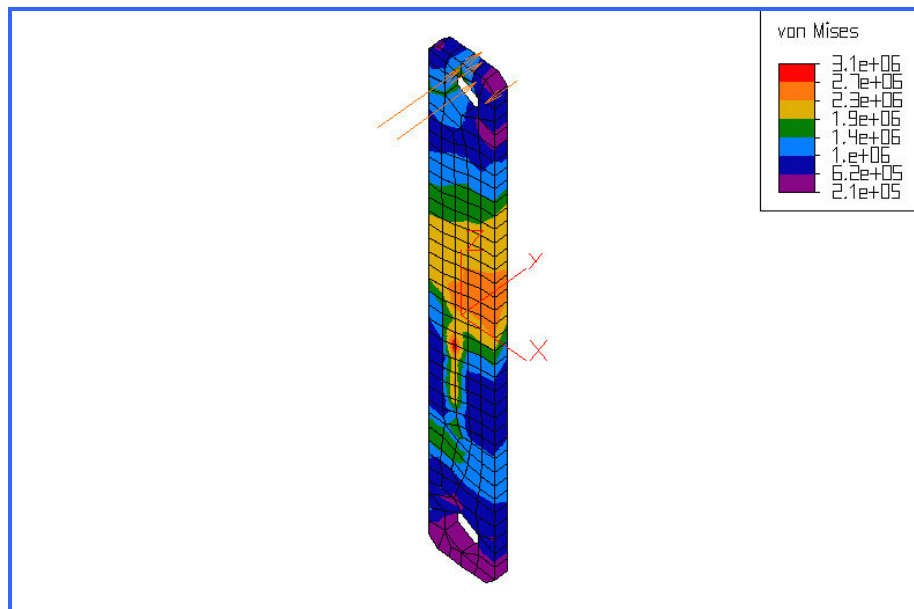


SISDEI 51	ROBOT BIPEDO AGUILES	ESQUEMATICO	
CORPORACION UNIVERSITARIA AUTONOMA DE OCCIDENTE		APROBADO POR: OSCAR VAN CAMPO	
		DIBUJADO POR: DRAGO BUSSICH	144
			A4



POTENCIA	ROBOT BIPEDO AGUILES	ESQUEMATICO		
CORPORACION UNIVERSITARIA AUTONOMA DE OCCIDENTE			APROBADO POR: OSCAR IVAN CAMPO	
			DIBUJADO POR: DRAGO DUSSICH	A4

Design Analysis



Summary

Analysis Type

Linear Static Stress

Description

Comparison between two posible designs of crankshaft elements, subject to flecion y torsion.

Created By

Drago Dussich
Programa de Ingeniería Mecatrónica
Project created on 2003/07/07-19:51:53.
Last updated on 2003/07/07-20:03:06.

Checked By

Ing. Oscar Iván Campo
Programa de Ingeniería Mecánica
Project checked on 07/07/03.

Group Information

Biela_paralela.par

Biela_contorno.par

Property	Biela_paralela	Biela_contorno
Area [mm^2]	1615.96	1433.42
Thickness [mm]	3	3
Mass [g]	38.08	33.768

Element Properties

Element Type	Linear Brick
Compatibility	Not Enforced
Integration Order	2nd Order
Stress Free Reference Temperature	0 °C
Use Solid Mesher Connectivity Data	Yes

Material Properties

Material Specified	[Customer Defined]
Material Model	Standard
Material Source	Not Applicable
Material Source File	
Date Last Updated	2003/07/07-19:56:39
Material Description	Customer defined material properties
Mass Density	0.007855 g/mm ³
Modulus of Elasticity	19995000000 dyn/mm ²
Poisson's Ratio	0.3
Thermal Coefficient of Expansion	0.0000117 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	7722100000 dyn/mm ²

Global Information

Load Case Multiplier 1 - Pressure	1.0000000000000000e+000
Load Case Multiplier 1 - Accel/Gravity	0
Load Case Multiplier 1 - Boundary	0
Load Case Multiplier 1 - Thermal	0
Acceleration Due To Body Force	9814.56 mm/s ²

Gravity/Acceleration X Multiplier	0
Gravity/Acceleration Y Multiplier	0
Gravity/Acceleration Z Multiplier	-1
Include Specified Centrifugal Load	No
Default Nodal Temperature	0 °C
Source of Nodal Temperature	None
Time step from Heat Transfer Analysis	Last
Disable Calculation and Output of Strains	No
Calculate Reaction Forces	No
Invoke Banded Solver	Yes
Avoid Bandwidth Minimization	Yes
Stop After Stiffness Calculations	No
Displacement Data in Output File	No
Stress Data in Output File	No
Equation Numbers Data in Output File	No
Element Input Data in Output File	No
Nodal Input Data in Output File	No
Centrifugal Load Data in Output File	No

Processor Output

Processor Summary

Algor (R) Linear Static Stress
Version 12.10-WIN 31-AUG-2001
Copyright (c) 1984-2001 Algor, Inc. All rights reserved.

DATE: JULY 7,2003
TIME: 08:00 PM
INPUT MODEL: D:\Documentos\Algor\contorno\Biela
ALG.DLL VERSION: 1000007

Linear Stress

1**** CONTROL INFORMATION

number of node points (NUMNP) = 2346
number of element types (NELTYP) = 1
number of load cases (LL) = 1
number of frequencies (NF) = 0
geometric stiffness flag (GEOSTF) = 0
analysis type code (NDYN) = 0
solution mode (MODEX) = 0
equations per block (KEQB) = 0
weight and c.g. flag (IWTG) = 0
bandwidth minimization flag (MINBND) = 0
gravitational constant (GRAV) = 9.8146E+03

**** PRINT OF NODAL DATA SUPPRESSED
**** PRINT OF EQUATION NUMBERS SUPPRESSED
**** PRINT OF TYPE-5 ELEMENT DATA SUPPRESSED
**** Hard disk file size information for processor:

Available hard disk space on current drive = 3689.656 megabytes

1**** ELEMENT LOAD MULTIPLIERS

load case	case A	case B	case C	case D	case E
1	1.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00

**** Invoking Sparse Solver ...
**** Symbolic Assembling Using the Row-Hits Matrix Profile ...
**** Assembled in One Block.
**** Real Sparse Matrix Assembly ...

1**** STIFFNESS MATRIX PARAMETERS

minimum non-zero diagonal element = 9.3401E+09
maximum diagonal element = 9.8297E+11
maximum/minimum = 1.0524E+02
average diagonal element = 3.5794E+10

in the upper off-diagonal matrix:
number of entries in the profile = 496986
number of symbolic nonzeros = 188820
number of real nonzeros = 188820

**** Sparse Matrix Assembled in One Block

```

**** Load case 1
**** Sparse Matrix Factorization ...
**** Sparse Matrix Solving ...
**** End Sparse Matrix Solution

```

1**** TEMPORARY FILE STORAGE (MEGABYTES)

```

-----
UNIT NO. 7 :    0.054
UNIT NO. 8 :    0.081
UNIT NO. 9 :    0.000
UNIT NO. 10 :   0.000
UNIT NO. 11 :   0.197
UNIT NO. 12 :   0.054
UNIT NO. 13 :   0.054
UNIT NO. 14 :   0.007
UNIT NO. 15 :   0.000
UNIT NO. 17 :   0.000
UNIT NO. 51 :   0.225
UNIT NO. 52 :   5.933
UNIT NO. 54 :   0.027
UNIT NO. 55 :   0.720
UNIT NO. 56 :   1.441
UNIT NO. 58 :   0.054

```

```

TOTAL      :    9.057 Megabytes

```

Processor Log

```

Algor (R) Linear Static Stress
Version 12.10-WIN 31-AUG-2001
Copyright (c) 1984-2001 Algor, Inc. All rights reserved.

```

Linear Stress

```

2346  0  1  0  0  0
**** Linear stress analysis
**** Memory Dynamically Allocated =    98096 KB

```

Options executed are:

```

NOMIN
STRAIN
SPARSE
SUPCNF
SUPELM
SUPNOD

```

processing ...

```

**** OPENING TEMPORARY FILES
NDYN = 0

DATE: JULY 7,2003
TIME: 08:00 PM
INPUT MODEL: D:\Documentos\Algor\contorno\Biela
ALG.DLL VERSION: 1000007

**** BEGIN NODAL DATA INPUT
2346 NODES
**** END NODAL DATA INPUT
**** BEGIN TYPE-5 DATA INPUT
1847 ELEMENTS
    1200 (65.%) elements remaining
    800 (43.%) elements remaining
    400 (22.%) elements remaining
    0 ( 0.%) elements remaining
**** END TYPE-5 DATA INPUT
**** Hard disk file size information for processor:

    Available hard disk space on current drive = 3689.656 megabytes

**** BEGIN LOAD INPUT
    Load factor = 1.00E+00 in the 1st basket in load case 1
    Fixing loads ...
**** END LOAD INPUT

**** Invoking Sparse Solver ...

**** Symbolic Assembling Using the Row-Hits Matrix Profile ...
**** Assembled in One Block.
**** Real Sparse Matrix Assembly ...
    in the upper off-diagonal matrix:
    number of entries in the profile = 496986
    number of symbolic non zeroes = 188820
    number of real non zeroes = 188820
**** Sparse Matrix Assembled in One Block
**** Load case 1
**** Sparse Matrix Factorialization ...
**** Sparse Matrix Solving ...
**** End Sparse Matrix Solution

**** BEGIN DISPLACEMENT OUTPUT
**** PRINT OF DISPLACEMENT OUTPUT SUPPRESSED
**** END DISPLACEMENT OUTPUT

Biela.t7 = 54.992 kilobytes
Biela.t8 = 82.566 kilobytes
Biela.t9 = 0.000 kilobytes

```

Biela.t10 = 0.000 kilobytes
 Biela.t11 = 202.078 kilobytes
 Biela.t12 = 54.984 kilobytes
 Biela.t13 = 54.992 kilobytes
 Biela.t14 = 6.893 kilobytes
 Biela.t15 = 0.000 kilobytes
 Biela.t17 = 0.000 kilobytes
 Biela.t51 = 230.875 kilobytes
 Biela.t52 = 6074.898 kilobytes
 Biela.t54 = 27.516 kilobytes
 Biela.t55 = 737.578 kilobytes
 Biela.t56 = 1475.156 kilobytes
 Biela.t58 = 54.984 kilobytes

total temporary disk storage (megabytes) = 9.0570

Biela.l = 3.601 kilobytes
 Biela.do = 110.016 kilobytes

**** BEGIN DELETING TEMPORARY FILES
 Processing completed for model:
 [D:\Documentos\Algor\contorno\Biela]
 **** TEMPORARY FILES DELETED
 **** END OF SUCCESSFUL EXECUTION

Total actual hard disk space used = 9.168 megabytes

Sub-total elapsed time = 0.334 minutes

Algor (R) FEA Stress Processor
 Version 12.06-WIN 01-NOV-2000
 Copyright (c) 1989-2000 Algor, Inc. All rights reserved.

**** Memory Dynamically Allocated = 98096 KB

**** INITIALIZING MAIN ARRAY
 Program initializing 98096 KB of memory
 Program initialized 98096 KB of memory
 Percent capacity: 0.1618

DATE: JULY 7,2003
 TIME: 08:00 PM
 INPUT.....D:\Documentos\Algor\contorno\Biela
 Percent capacity: 0.1337

**** BEGIN TYPE-5 STRESS OUTPUT
 1847 ELEMENTS
 Percent capacity: 0.2527

1392 elements remaining
 1044 elements remaining
 696 elements remaining
 348 elements remaining
 0 elements remaining
 Percent capacity: 0.1337
 **** Writing stress and strain output files ...
 0 load cases remaining
 **** Hard disk file size information for postprocessor:
 Biela.son = 1269.941 kilobytes
 Biela.nso = 519.516 kilobytes
 Biela.sto = 519.516 kilobytes

 Total MKNSO disk space used = 2.25486 megabytes
 **** End of successful execution
 **** MKNSO elapsed time = 0.454 minutes

 **** The TOTAL elapsed time = 0.788 minutes

Anexo P. Diagrama de flujo de los algoritmos de control.

